



**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Curso de Engenharia de Energia**

**MODELAGEM DE MÉTODOS DE PARTIDA DE MIT  
UTILIZANDO *MATLAB/SIMULINK***

**Autor: Eduardo Brito Lopo  
Orientador: Professor Dr. Flávio H. J. R. Silva  
Co-Orientador: Professor Dr. Luis F. de J. Fernandes**

**Brasília, DF  
2017**



**Eduardo Brito Lopo**

**MODELAGEM DE MÉTODOS DE PARTIDA DE MIT UTILIZANDO  
*MATLAB/SIMULINK***

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Professor Dr. Flávio H. J. R. Silva

Co-Orientador: Professor Dr. Luis Filomeno de J. Fernandes

**Brasília, DF  
2017**

### **CIP – Catalogação Internacional da Publicação\***

Lopo, Eduardo Brito.

Modelagem de Métodos de Partida de MIT Utilizando *Matlab/Simulink* / Eduardo Brito Lopo. Brasília: UnB, 2017.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília  
Faculdade do Gama, Brasília, 2017. Orientação: Professor Dr.  
Flávio H. J. R. Silva

1. Modelagem. 2. Métodos de Partida. 3. *Matlab/Simulink*. Silva,  
Flávio H. J. R. II. Modelagem de Métodos de Partida de MIT  
Utilizando *Matlab/Simulink*.

- A ficha catalográfica oficial deverá ser solicitada à Biblioteca pelo aluno após a apresentação.



**MODELAGEM DE MÉTODOS DE PARTIDA DE MIT UTILIZANDO  
*MATLAB/Simulink***

**Eduardo Brito Lopo**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 10/07/17 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof. Dr. Flávio H. J. R. Silva, UnB/ FGA**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Luis F. de J. Fernandes, UnB/ FGA**  
Co-Orientador

---

**Prof. Dr. Felix M. C. Gamarra, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

Brasília, DF  
2017



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por me permitir mais um trabalho e a oportunidade de chegar ao final do curso. Agradeço pela vida que Ele me deu exatamente como ela é. Agradeço àqueles que também me deram e dão a vida por mim, meu pai e minha mãe, e a todos aqueles que torcem e me incentivam todos os dias.

Agradeço ao meu orientador Professor Dr. Flávio por ter proposto e aceito o desafio mesmo quando muito estive ausente. Agradeço também ao Professor Dr. Filomeno que me encorajou e incentivou o trabalho, através da cobrança, procurando o meu melhor. E agradeço também à Professora Dra. Josiane Aguiar que me orientou durante o período de formação.

"Buscai as coisas do Alto."  
(Pe. Léo)

## RESUMO

O presente trabalho tem como tema a modelagem de métodos de partida de motores trifásicos utilizando o aplicativo do software *Matlab*. Existem vários tipos de métodos de partida, no qual se deve escolher o tipo que mais se adequa ao requisitos do sistema. Seu ensino é muito importante na vida profissional para que se possa fazer a melhor escolha. Ao se simular os tipo de partida no *Simulink*, é possível observar o comportamento do motor, especialmente da corrente, durante o período transitório. Momento esse crucial para o sistema em que ele está sendo incluído. Os métodos servem para que se possa amenizar as interferências no sistema ao entrar o motor. Assim, se comparando os métodos, e as respostas simuladas, pode-se escolher qual é o melhor para cada caso. Propor que estudantes de graduação possam ter melhor entendimento sobre os métodos através das simulações e experimentos propostos para serem simulados, e mostrar a importância dessa ferramenta para o aprendizado de máquinas elétricas.

**Palavras-chave:** Modelagem. Métodos de partida. *Simulink/Matlab*®.

## ABSTRACT

The present work has as its theme the modeling methods of starting AC motors using *Matlab Simulink* application software. There are several types of starting methods, in which one must choose the type that best fits system requirements. His college teaching is very important so you can make the best choice. To simulate the type of match in *Simulink*, it is possible to observe the behavior of the engine, especially the chain, during the transitional period. This crucial time for the system in which it is being included. The methods that can be used to mitigate the interference in the system to enter the engine. Thus, comparing the methods, and simulated responses, you can choose which is best for each case. Propose that graduate students have better understanding about the methods through simulations and proposed to be simulated experiments, and show the importance of this tool for learning of electric machines.

**Keywords:** Modeling. Departure Methods. *Simulink/Matlab®*..

## Lista de Ilustrações

Figura 1 - Conjugado acelerante (Fonte: [9]).....	21
Figura 2 - Conjugado x Rotação (Fonte: [15]).....	22
Figura 3 - Ponto de operação do motor em regime permanente (Fonte: [15]).....	23
Figura 4 - Circuito Equivalente Monofásico do MIT (Fonte: [18]).....	24
Figura 5 - Corrente de Partida Direta (Fonte: [9]) .....	24
Figura 6 - Placa de um MIT .....	25
Figura 7 - Explicação das informações .....	27
Figura 8 – Contator (Fonte: [9]).....	29
Figura 9 - Esquema Funcionamento Contator (Fonte: [8]).....	29
Figura 10 - Terminais principais de um Contator (Fonte: [5]).....	30
Figura 11 - Terminais principais contator (Fonte: [8]) .....	30
Figura 12 - Terminais auxiliares de um contator (Fonte: [5]).....	30
Figura 13 - Terminais auxiliares de um contator (Fonte: [8]).....	31
Figura 14 - Diagrama de Força Partida Direta (Fonte: [10]).....	33
Figura 15 - Diagrama de Comando Partida Direta (Fonte: [10]) .....	34
Figura 16 - Diagramas de Ligação Partida Estrela-Triângulo (Fonte: [5]).....	37
Figura 17 - Diagramas de Força Partida Estrela-Triângulo na configuração Estrela (Fonte: [17]).....	38
Figura 18 - Diagramas de Comando Partida Estrela-Triângulo na configuração Estrela (Fonte: [17]).....	39
Figura 19 - Diagramas de Força Partida Estrela-Triângulo na configuração Triângulo (Fonte: [17]).....	40
Figura 20 – Diagrama de comando partida estrela-triângulo na configuração triângulo (Fonte: [17]).....	41
Figura 21 – Autotransformador Trifásico (Fonte: [16]).....	43
Figura 22 - Diagrama de força (a) e comando (b) da Chave Compensadora (Fonte: [5]) .....	46
Figura 23 - Diagrama de Força da Chave Compensadora (Fonte: [16]).....	47
Figura 24 - Diagrama de comando da chave compensadora (Fonte: [16]) .....	48
Figura 25 - Diagrama de força da chave compensadora acionada (Fonte: [16]) .....	49
Figura 26 - Diagrama de comando da chave compensadora acionada (Fonte: [16]).....	50
Figura 27 - Diagrama de força da chave compensadora desarmada (Fonte: [16]) .....	51
Figura 28 - Diagrama de comando da Chave Compensadora desarmada (Fonte: [16]) .....	52
Figura 29 - Esquema <i>Soft-Starter</i> (Fonte: [9]) .....	54
Figura 30 - Rampa de aceleração <i>Soft-Starter</i> (Fonte: [5]).....	55
Figura 31 - Variação de tensão no motor na aceleração por <i>Soft-Starter</i> (Fonte: [9]).....	55
Figura 32 - Comparação Corrente x Velocidade <i>Soft-Starter</i> /Partida Direta (Fonte: [5]) .....	56
Figura 33 - Rampa de desaceleração <i>Soft-Starter</i> (Fonte: [5]).....	56
Figura 34 - <i>Kick Start</i> (Fonte: [5]) .....	57
Figura 35 - Limitação de corrente <i>Soft-Starter</i> (Fonte: [4]).....	58
Figura 36 - Economia de energia por <i>Soft-Starter</i> (Fonte: [14]).....	59
Figura 37 - Ligação direta <i>Soft-Starter</i> (Fonte: [5]).....	59
Figura 38 - Ligação contator em paralelo (Fonte: [5]).....	60
Figura 39 - Ligação Sequencial de vários motores via <i>soft-starter</i> (Fonte: [5]).....	61
Figura 40 - Ligação simultânea de vários motores via <i>soft-starter</i> (Fonte: [5]) .....	61
Figura 41 - Diagrama de comando <i>soft-starter</i> (Fonte: [5]).....	62
Figura 42 - Fonte trifásica de 220V composta por fontes de tensão alternada .....	64
Figura 43 - Fonte trifásica programável de 220V .....	65

Figura 44 - Medidor trifásico de corrente e tensão .....	66
Figura 45 - Medidores de corrente e tensão .....	66
Figura 46 - Configurações do motor .....	67
Figura 47 - Configurações internas do motor .....	68
Figura 48 - Motor escolhido para o trabalho.....	68
Figura 49 - Bus selector .....	69
Figura 50 – Ganho.....	70
Figura 51 - Autotransformador .....	70
Figura 52 - Contator trifásico .....	71
Figura 53 - Construtor de sinais .....	71
Figura 54 - Configuração do construtor de sinais .....	72
Figura 55 - Bloco powergui .....	72
Figura 56 - Plotador de dados .....	73
Figura 57 - Bloco constante .....	73
Figura 58 - Bloco <i>rms</i> .....	73
Figura 59 - Partida Direta Fonte Programável .....	74
Figura 60 - Partida Direta Fonte em Estrela.....	74
Figura 61 - Torque, Corrente e Velocidade do rotor para partida direta.....	75
Figura 62 - Tensão de fase no estator e rotor na partida direta .....	75
Figura 63 - Medições na fonte trifásica.....	76
Figura 64 - Relação $I_p/I_n$ na partida direta .....	76
Figura 65 - Ligação interna do motor em estrela .....	77
Figura 66 - Configurações do autotransformador .....	78
Figura 67 - Parâmetros do autotransformador.....	79
Figura 68 - Circuito da partida compensadora.....	79
Figura 69 - Tensões de linha relativas aos terminais do autotransformador para o TAP 50% .....	80
Figura 70 - Correntes no lado de alta e baixa do circuito para o TAP 50%.....	81
Figura 71 - Torque, corrente e velocidade do rotor para o TAP 50%.....	82
Figura 72 - Tensões de linha relativas aos terminais do autotransformador para o TAP 65% .....	82
Figura 73 - Tensões de linha relativas aos terminais do autotransformador para o TAP 80% .....	83
Figura 74 - Correntes no lado de alta e baixa do circuito para o TAP 65%.....	83
Figura 75 - Correntes no lado de alta e baixa do circuito para o TAP 80%.....	84
Figura 76 - Torque, corrente e velocidade do rotor para o TAP 65%.....	84
Figura 77 - Torque, corrente e velocidade do rotor para o TAP 80%.....	85
Figura 78 - Comparativo das linhas para carga de 3Nm.....	86
Figura 79 - Comparativo das linhas para carga de 25 Nm.....	86

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 - Classificação do MIT quanto ao conjugado (Fonte: [9]) .....	25
Tabela 2 - Conjugados de acordo com os TAP's de autotransformadores comerciais (Fonte: [5]) .....	45
Tabela 3 - Valores das relações de TAP do autotransformador .....	80
Tabela 4 - Resumo dos resultados.....	87

## Lista de Abreviaturas e Siglas

CV	Cavalo Vapor
MIT	Motores de Indução Trifásicos
NA	Normalmente Aberto
NBR 5410	Norma Brasileira 5410
NBR 7094	Norma Brasileira 7094
NF	Normalmente Fechado
RPM	Rotações Por Minuto
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i> – Retificador Controlado de Silício
TAP	Saída de Tensão no Autotransformador
RMS	Root mean square
PU	Por unidade



## Lista de Símbolos

$s$	Escorregamento
$f_e$	Frequência elétrica
$C$	Conjugado
$I$	Corrente
$\hat{I}_1$	Corrente na malha 1
$\hat{I}_2$	Corrente na malha 2
$\hat{I}_m$	Corrente de magnetização
$I_L$	Corrente de linha
$I_Y$	Corrente em estrela
$I_{F\Delta}$	Corrente de fase em delta
$I_{L\Delta}$	Corrente de linha em delta
$I_L$	Corrente de linha
$I_n$	Corrente nominal
$K$	Constante do motor
kW	KiloWatt
ms	Milissegundo
$N_{entrada}$	Número de espiras na entrada dos enrolamentos do transformador
$n_s$	Velocidade síncrona, Velocidade do estator
$n_r$	Velocidade do rotor
$n_n$	Velocidade nominal
$N_{saída}$	Número de espiras na saída dos enrolamentos do transformador
$p$	Número de pólos
$R_1$	Resistencia do estator
$R_2$	Resistencia do rotor refletida ao lado do estator
$R_m$	Resistência de perdas no núcleo do motor
rad	Radianos
$T$	Torque
$T_\Delta$	Torque em delta
$T_Y$	Torque em estrela
$T_d$	Tempo de desaceleração
$T_p$	Tempo de partida
TC	Transformador de Corrente
$s$	Segundo
$\hat{U}_1$	Tensão na malha 1
$\hat{U}_2$	Tensão na malha 2
$V$	Tensão
$V_d$	Tensão de desaceleração
$V_{entrada}$	Tensão de entrada
$V_\Delta$	Tensão em delta
$V_{FY}$	Tensão de fase em estrela
$V_{F\Delta}$	Tensão de fase em delta
$V_{LY}$	Tensão de linha em estrela
$V_n$	Tensão nominal
$V_p$	Tensão de partida
$V_{saída}$	Tensão de saída
$X_1$	Reatância do estator
$X_2$	Reatância de dispersão

$X_m$	Reatância de magnetização mútua
$Z$	Impedância
A	Corrente, Ampère
Nm	Newton metro

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	18
1.2. OBJETIVOS .....	18
1.2.1. Objetivo Geral .....	18
1.2.2. Objetivo Específico .....	19
1.3. METODOLOGIA .....	19
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	19
<b>2. MODELAGEM DE UM MIT .....</b>	<b>19</b>
2.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO .....	19
2.2. O CIRCUITO EQUIVALENTE.....	23
2.3. CATEGORIA DE CONJUGADO.....	25
2.4. PLACA DO MOTOR.....	25
<b>3. MÉTODOS DE PARTIDA .....</b>	<b>27</b>
3.1. COMANDO .....	28
3.2. PARTIDA DIRETA.....	31
3.2.1. Equacionamento .....	31
3.2.2. Esquema de Ligação .....	32
3.2.3. Vantagens e Desvantagens.....	34
3.3. PARTIDA ESTRELA-TRIÂNGULO.....	35
3.3.1. Equacionamento .....	35
3.3.2. Esquema de Ligação .....	37
3.3.3. Vantagens e Desvantagens.....	42
3.4. PARTIDA DE CHAVE COMPENSADORA.....	42
3.4.1. Equacionamento .....	43
3.4.2. Esquema de Ligação .....	45
3.4.3. Vantagens e Desvantagens.....	52
3.5. PARTIDA <i>SOFT-STARTER</i> .....	53
3.5.1. Princípio de Funcionamento.....	54
3.5.2. Rampa de Tensão na Aceleração.....	54
3.5.3. Rampa de Tensão na Desaceleração .....	56
3.5.4. Kick-Start .....	57
3.5.5. Limitação de Corrente .....	58
3.5.6. Economia de Energia Elétrica .....	58
3.5.7. Formas de Ligação .....	59
3.5.8. Vantagens e Desvantagens.....	62
<b>4. MODELAGEM DOS MÉTODOS DE PARTIDA UTILIZANDO O MATLAB.....</b>	<b>63</b>
4.1. 4.1 ELEMENTOS UTILIZADOS.....	63
4.1.1. Fonte .....	63
4.1.2. Medidores de tensão e corrente .....	65
4.1.3. Motor .....	66
4.1.4. <i>Bus selector</i> .....	69

4.1.5.	<i>Gain</i> .....	69
4.1.6.	Autotransformador .....	70
4.1.7.	Contator .....	70
4.1.8.	Construtor de sinais.....	71
4.1.9.	<i>Powergui</i> .....	72
4.1.10.	<i>Scope</i> .....	73
4.1.11.	<i>Constant</i> .....	73
4.1.12.	<i>RMS</i> .....	73
4.2.	PARTIDA DIRETA.....	<b>73</b>
4.2.1.	Modelagem .....	73
4.2.2.	Resultados .....	74
4.3.	PARTIDA ESTRELA-TRIÂNGULO.....	<b>76</b>
4.4.	PARTIDA COMPENSADORA .....	<b>77</b>
4.4.1.	Modelagem .....	77
4.4.2.	Resultados .....	80
4.5.	COMPARATIVO PARTIDAS.....	<b>85</b>
5.	CONCLUSÕES .....	<b>87</b>
6.	TRABALHOS FUTUROS .....	<b>89</b>
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	<b>90</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Estima-se que o mercado mundial de motores elétricos de todos os tipos seja da ordem de uma dezena de bilhões de dólares por ano. No campo de acionamentos industriais, avalia-se que de 70% a 80 % da energia elétrica consumida pelo conjunto de todas as indústrias seja transformada em energia mecânica por motores elétricos [5].

Os motores de indução trifásicos são máquinas bastante utilizadas nas indústrias. Elas apresentam uma facilidade de manutenção, baixo custo, simplicidade de controle, entre outros fatores como vantagem em relação a outros motores, como a sua simplicidade e máxima eficácia com o mínimo de tensão [4] [5]. Por esse motivo, elas podem chegar a corresponder 90% das cargas instaladas nas indústrias [19]. Esse motor em operação requisitará potências do sistema de alimentação de acordo com a sua carga consumida. Depende do sistema alimentador estar preparado fornecer tal energia para o consumo.

A utilização dos MIT é aconselhável a partir de 2 kW. São melhores pois apresentam partida mais fácil, ruído menor e são mais baratos para potências maiores que 2 kW [5].

Mas antes de se falar propriamente dos tipos de partida, é necessário falar-se sobre o conjugado. O conjugado é a medida de esforço necessário para girar o eixo, ou seja, o torque necessário para tirar o eixo de sua inércia. Ao esforço para girar o eixo denomina-se de conjugado do motor, enquanto que se há carga acoplada, denomina-se conjugado de carga ou conjugado resistente, já que a carga fará um esforço negativo (de resistência).

Em uma partida, é necessário que o conjugado do motor seja superior ao conjugado resistente, durante o tempo de aceleração do conjunto, até que o motor adquira a velocidade de regime.

Existem vários tipos de partida de motores, dentre os quais se pode destacar:

- Partida direta;
- Partida Estrela-Triângulo;
- Partida Chave Compensadora e
- Partida *Soft-Starter*

Essas partidas se destacam por serem as mais difundidas no mercado e utilizada nas indústrias. E cada uma pode ser a ideal dependendo do sistema no

qual o motor será ligado. Tudo depende dos requisitos e da configuração do sistema. Sempre será necessário avaliar os quesitos de segurança, operação e custos para o sistema. Dessa avaliação que se pode determinar, ou escolher, qual partida será utilizada.

Por ser tão determinante, que se é necessário que se tenha conhecimento pleno sobre o funcionamento das partidas de motores e saiba-se escolher qual a mais adequada. Assim, para o ensino e aprendizagem de partida de motores a utilização de métodos que facilitem a compreensão e utilidade, onde possam ajudar a fixação do conteúdo, é extremamente importante.

Para a simulação de partida de motores, pode-se usar uma ferramenta do *Matlab*, que é denominada *Simulink*. Com esse aplicativo se simular o funcionamento de um motor trifásico, inclusive a partida, utilizando os vários métodos de partida. Dessa simulação pode-se obter o comportamento da corrente no acionamento, a variação da tensão, da velocidade do motor, entre outros parâmetros. E avaliando o comportamento desses parâmetros, tem-se uma base para escolha do método mais adequado em relação às premissas do projeto no qual o motor pode ser inserido.

## 1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

No campo de acionamentos industriais, avalia-se que de 70 a 80% da energia elétrica consumida pelo conjunto de todas as indústrias seja transformada em energia mecânica [5] através de motores elétricos. Durante a partida, podem solicitar da rede de alimentação correntes que podem chegar na ordem de 6 a 10 vezes o valor da corrente nominal [4], que podem causar interferência na rede como afundamentos de tensão, por exemplo. Existem alguns métodos de partida que servem para diminuir essa interferência na rede, diminuindo a magnitude da corrente de partida.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo Geral

Estudar o funcionamento dos métodos de partida e realizar a modelagem de alguns métodos no *Simulink/Matlab*.

### 1.2.2. Objetivo Específico

Modelar no *Simulink/Matlab* as partidas direta, estrela-triângulo e chave compensadora para um Motor de Indução Trifásica.

## 1.3. METODOLOGIA

A metodologia consistiu na definição dos métodos de partida a serem estudados, depois o levantamento bibliográfico, subsequentemente a modelagem dos métodos e a escrita do trabalho.

## 1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho é organizado em 6 capítulos. O primeiro capítulo é introdutório, o segundo trata sobre o motor de indução trifásica. No terceiro capítulo são abordados quatro métodos de partida de motor. No quarto capítulo é feita a modelagem e a simulação de três métodos de partida. No quinto capítulo é feita a conclusão e o sexto a indicação de trabalhos futuros.

## 2. MODELAGEM DE UM MIT

### 2.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Ao alimentar o estator por correntes trifásicas, é criado um campo magnético girante que passa a agir como se houvesse apenas um par de pólos com magnitude constante. Esse campo girante resultante desloca-se com velocidade  $w_s$  ( $w_s = 2\pi f_e$ ) [9]. Ele acaba induzindo tensões nos condutores do rotor, gerando corrente e assim um campo de polaridade oposta à do campo girante. Os campos acabam se atraindo, fazendo com que o rotor gire no sentido do campo girante.

A velocidade síncrona é a velocidade de campo do estator, ou seja, é a velocidade do campo girante. Ela é correspondente à frequência aplicada no estator e ao número de polos ( $p$ ) do enrolamento do estator [3] e de que maneira estão distribuídas e ligadas as bobinas no estator do motor [9]. A velocidade

$$n_s = \frac{120 \times f_e}{p} \text{ rpm} \quad (1)$$

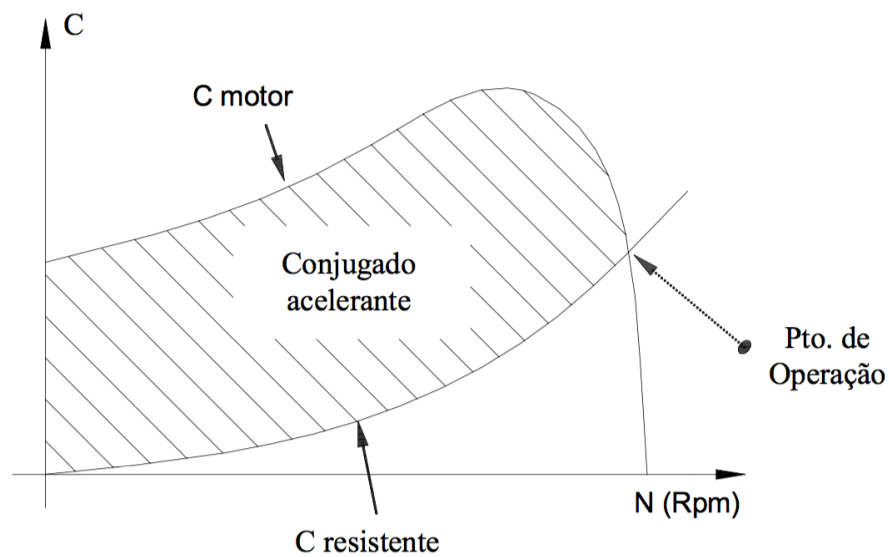
O elemento  $s$  é o escorregamento da velocidade. Ele é uma porcentagem da diferença da velocidade do estator ( $n_s$ ), também chamado de velocidade síncrona, e da velocidade no rotor ( $n_r$ ) em relação a velocidade do estator. A relação é dada pela Eq. (2).

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \quad (2)$$

É necessário que haja o escorregamento, pois em máquinas de indução não possuem campos elétricos, apenas magnéticos [1]. Então ele é necessário para que seja produzido campo magnético e assim seja gerado torque. Se ocorrerem das velocidades serem iguais e não existir escorregamento, a posição relativa da espira e do campo girante permanece inalterada, não havendo variação de fluxo, nem corrente induzida e não haveria conjugado [9]. Lembra-se ainda que, em plena carga, o escorregamento de um motor em regime permanente é entre 1,5% e 7% [9].

Quando ligados, os motores elétricos apresentam um esforço que lhes permite girar o seu eixo. Esse esforço é denominado conjugado do motor. Já a carga acoplada reage a este esforço negativamente, logo ela é denominada conjugado de carga ou conjugado resistente. [4]. A diferença entre o conjugado do motor e o conjugado resistente é chamado de conjugado acelerante [15], observado na Figura 1.





**Figura 1 - Conjugado acelerante (Fonte: [9])**

A curva característica conjugado x rotação, Figura 2, torna possível projetar com precisão sistemas de acionamento de cargas [15]. Nesta curva pode-se identificar 3 pontos essenciais:

- Conjugado de partida (1) → conjugado desenvolvido pelo motor com rotação nula;
- Conjugado máximo (2) → conjugado máximo que o motor consegue desenvolver;
- Conjugado nominal (3) → máximo conjugado que o motor pode desenvolver em regime contínuo.

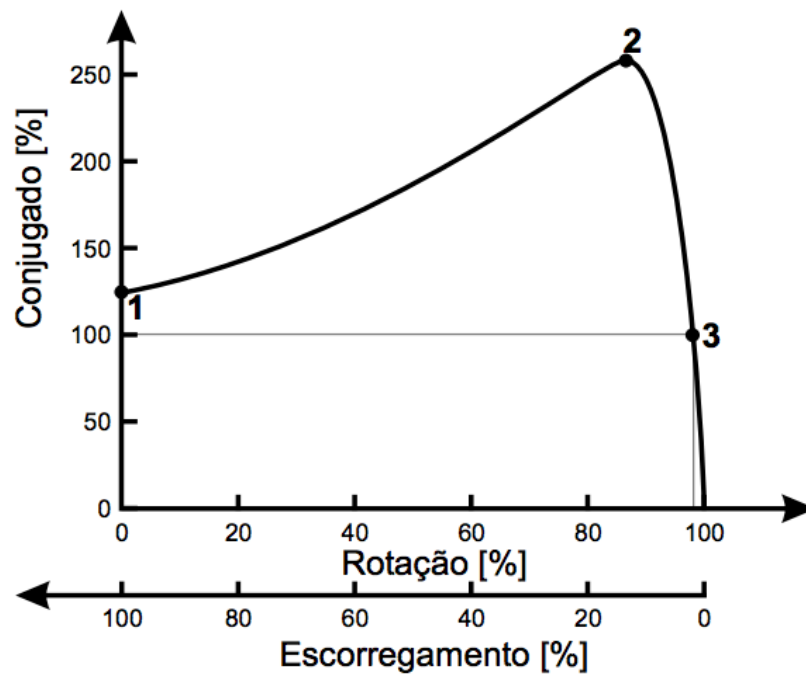


Figura 2 - Conjugado x Rotação (Fonte: [15])

Ao se sobrepor a linha do conjugado resistente, acaba-se achando o ponto ótimo de operação, que é o torque máximo que o motor pode desenvolver em regime permanente. Na Figura 3 pode-se observar exatamente esse ponto e também a área do conjugado acelerante. Observa-se que do ponto de operação do motor, sua abscissa será a velocidade nominal de funcionamento, ponto esse indicado pela seta.

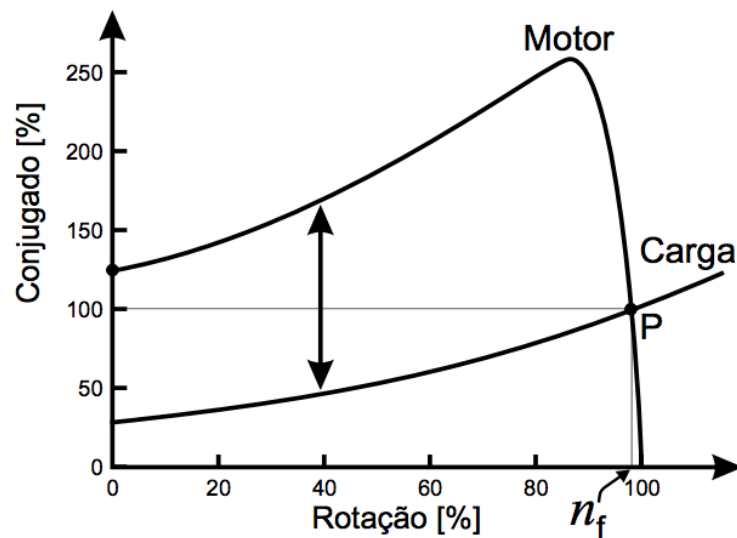


Figura 3 - Ponto de operação do motor em regime permanente (Fonte: [15])

O conjugado varia com o quadrado da tensão de alimentação do estator. Assim é possível aumentar ou diminuir o conjugado de um motor, em particular o conjugado máximo, variando-se a tensão de suprimento [9].

## 2.2. O CIRCUITO EQUIVALENTE

Os MIT agem como transformadores, e tem sua representação igual ao de um transformador. Desse caso, pode-se refletir o secundário ao lado do primário ou o inverso, ou seja, aplicando-se ao caso do MIT, o lado do rotor pode ser refletido ao lado do estator, ou vice-versa.

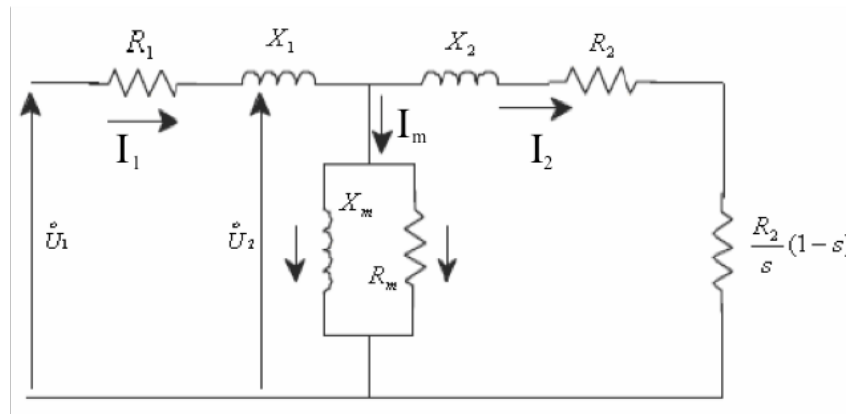
O MIT pode ser modelado através de um modelo unifilar, se os enrolamentos forem trifásicos e equilibrados no estator. Cada fase é distribuída espacialmente por  $120^\circ$  no perímetro do estator, e cada enrolamento possui o mesmo número de espiras, sob condição de alimentação senoidal e equilibrada.

O circuito equivalente é dado pela Figura 4. Dele pode-se tirar que a corrente  $I_2$ , proveniente da Eq. (5) será a corrente de partida requerida pela carga.

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_m + \hat{I}_2 \quad (3)$$

$$\hat{I}_2 = \frac{\hat{U}_2}{R_2 + jX_2} \quad (4)$$

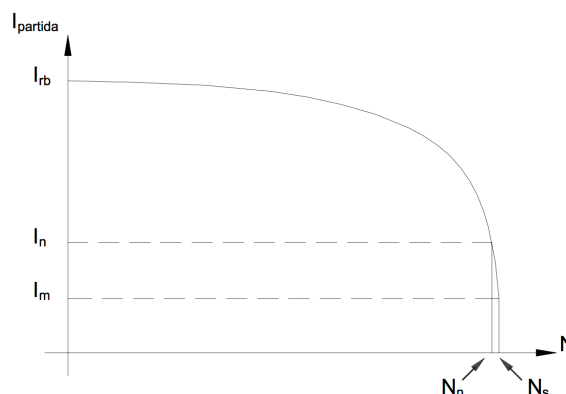
$$I_2 = \frac{U_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} \quad (5)$$



**Figura 4 - Circuito Equivalente Monofásico do MIT (Fonte: [18])**

Nesta representação todos os elementos são representados por fase. Na Figura 4  $R_1$  é a resistência do estator,  $X_1$  é a reatância do estator,  $R_2$  é a resistência do rotor refletida ao lado do estator,  $X_2$  é a reatância de dispersão,  $X_m$  é a reatância de magnetização mútua e  $R_m$  é a resistência de perdas no núcleo do motor.

À medida que o motor aumenta a velocidade, por consequência o escorregamento  $s$  vai assumindo valores decrescentes, tendendo a zero, como observado na Figura 2, onde a medida que a rotação cresce, o escorregamento decresce, e a corrente absorvida também vai decrescendo, tendendo ao valor de corrente em vazio do motor, como pode ser observado na Figura 5.



**Figura 5 - Corrente de Partida Direta (Fonte: [9])**

### 2.3. CATEGORIA DE CONJUGADO

Os motores podem ser classificados de acordo com o as categorias de conjugado, que variam de acordo com a sua construção. A norma NBR 7094 faz essa classificação presente na Tabela 1).

Tabela 1 - Classificação do MIT quanto ao conjugado (Fonte: [9])

Categoria	Conjugado de partida	Corrente de Partida	Escorregamento
Categoria N	Normal	Normal	Baixo
Categoria H	Alto	Normal	Baixo
Categoria D	Alto	Normal	Alto

Os motores da Categoria N destinam-se cargas como bombas, máquinas operatrizes e ventiladores. Da Categoria H são recomendados para esteiras transportadoras, peneiras, britadores e trituradores. Da Categoria D usa-se em prensas excêntricas, elevadores e acionamento de cargas com picos periódicos [9].

### 2.4. PLACA DO MOTOR

A placa do motor, Figura 6, é onde se encontram todas as informações importantes do motor. É um resumo de todas as suas características.

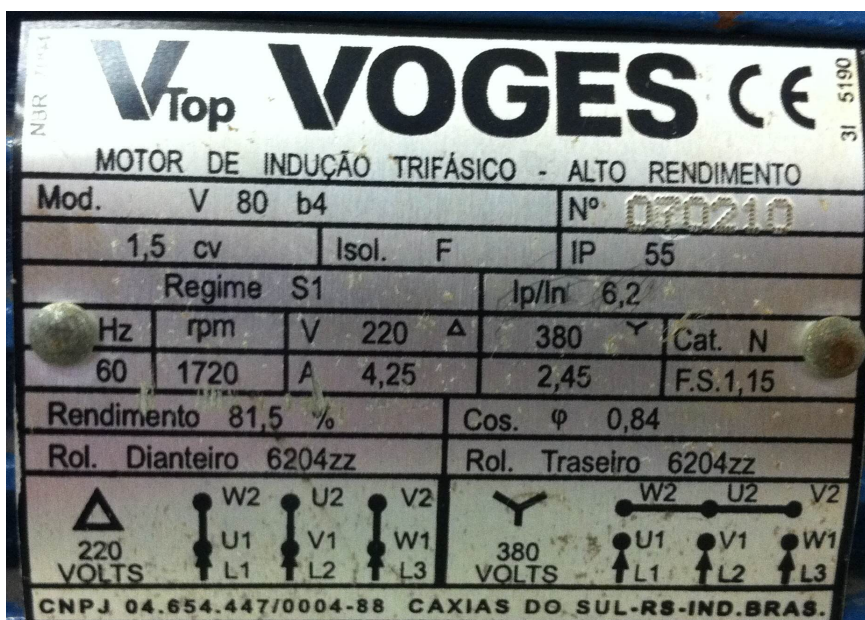


Figura 6 - Placa de um MIT

Identifica-se na Figura 7 as informações que podem ser retiradas da placa:

1. Potência do motor (quadrado preto): Potência real ou de trabalho realizada pelo motor. No caso deste motor, sua potência é de 1,5 cv. Lembre-se que 1cv é aproximadamente 736W.
2. Frequência (quadrado cinza): Frequência de operação do motor, no caso 60 Hz.
3. Velocidade de operação (quadrado vinho): Velocidade, em rpm, na ponta do eixo do rotor, no caso 1720 rpm.
4. Configuração em delta (quadrado verde): Valor da tensão elétrica, em Volts, e da corrente, em Amperes, quando ligado na configuração delta. No caso, 220V e 4,25A.
5. Configuração em estrela (quadrado vermelho): Valor da tensão elétrica, em Volts, e da corrente, em Amperes, quando ligado na configuração estrela. Para o motor da figura 380V e 2,45A.
6. Categoria do motor (quadrado marrom): categoria do motor, no caso do da figura, categoria N.
7. Fator de serviço – F.S. (quadrado rosa): capacidade do motor tem de suportar sua capacidade nominal, ou seja, o quanto de sobrecarga ele é capaz de suportar sobre condições especificadas. Não confundir com sobrecargas momentâneas durante curto período de tempo. Valores acima deste o motor pode apresentar problemas. No caso, o valor é de 1,15, o que significa que o motor aguenta 15% acima de sua capacidade.
8. Razão  $I_p/I_n$  (quadrado amarelo): quantas vezes a corrente de partida pode ser maior que a nominal. Para o motor da figura, o valor da corrente de pico pode ser 6,2 vezes maior que a nominal.
9. Grau de proteção do MIT (quadrado azul claro): capacidade do motor tem de resistir a entrada de sólidos e de água. Essas informações são normatizadas.
10. Rendimento do motor (quadrado roxo): Quanto de energia ele converte em relação ao quanto ele recebe. No caso do motor da figura, 81,5%.
11. Fator de potência (quadrado azul escuro): Valor do fator de potência do motor, no caso do da figura, seu valor é 0,84.
12. Sistema de fechamento (quadrado branco): Fechamento do motor para os níveis de tensão ao qual ele foi projetado. Mostra como devem ser ligados os *bornes* do motor.

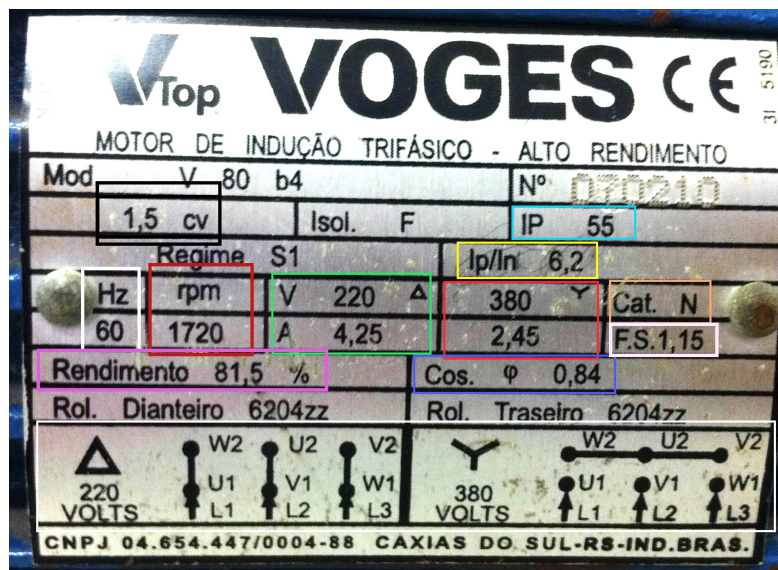


Figura 7 - Explicação das informações

### 3. MÉTODOS DE PARTIDA

A utilização de sistemas de partida eficientes servem para se obter uma boa utilização do motor, afim de se atingir uma vida útil prolongada, custos operacionais reduzidos, além de dar à equipe de manutenção da indústria tranquilidade no desempenho das tarefas diárias [4].

Os critérios para a seleção do método de partida adequado envolve considerações quanto a capacidade da instalação, requisitos de carga a ser considerada, além da capacidade do gerador. Por isso, é importante que nas disciplinas haja um bom aprofundamento teórico e prático para haver uma melhor compreensão dos métodos de partida.

A importância de se entender a metodologia embutida nos diferentes tipos de partida é realizar a escolha de um método que possa ser aplicado de maneira adequada às necessidades da instalação, considerando aspectos técnicos e econômicos. Afinal, uma boa escolha, mesmo gerando custos, trará mais benefícios e confiabilidade.

A NBR 5410 limita as perturbações devidas às partidas de motores. Ela determina que para evitar as perturbações deve ser observado [7]:

- As restrições impostas pela empresa distribuidora de energia elétrica à partidas de motores;
- O dimensionamento dos condutores que alimentam motores deve ser tal que, durante a partida do motor, a queda de tensão nos terminais do dispositivo de

partida não ultrapasse 10% da respectiva tensão nominal, observados os limites para os demais pontos de utilização da instalação determinados na mesma norma.

- Em certas aplicações, a queda de tensão nos terminais do dispositivo de partida do motor pode ser superior a 10% da respectiva tensão nominal, de modo a não prolongar o tempo de aceleração do motor.

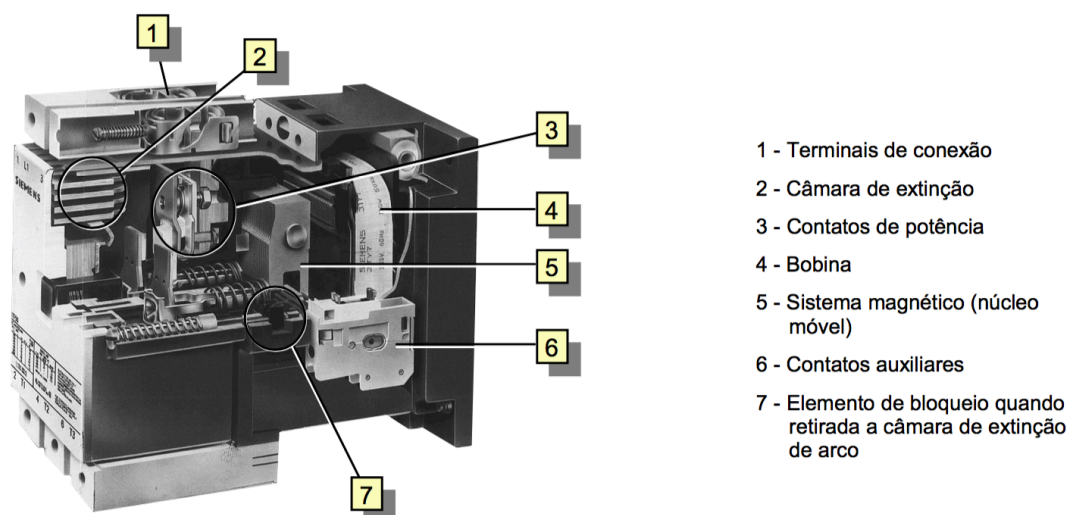
Os métodos mais comuns de partida de motor são: Partida Direta, Partida Estrela-Triângulo, Partida de chave Compensadora e a Partida *Soft-Starter*. A diferença básica entre a partida direta e as outras partidas é que o motor parte com os valores de conjugado e corrente de partida plenos, pois as bobinas do motor recebem tensão nominal, que é a tensão da rede de alimentação. Ou seja, a partida direta utiliza os valores de correntes que serão demandados pelo motor para a partida. Quando ocorre restrição quanto ao valor de pico da corrente na partida, utiliza-se mecanismos de partida indiretos para diminuir a corrente de partida, que são os demais tipos de partida citados anteriormente.

Em cada tipo de partida será apresentado o diagrama de comando e o diagrama de força. O diagrama de força é o desenho que mostra como é ou deve ser feita a ligação dos componentes no circuito. É a representação de como os elementos serão ligados. Já o diagrama de comando é o desenho do circuito que vai servir para comandar a operação do circuito em si.

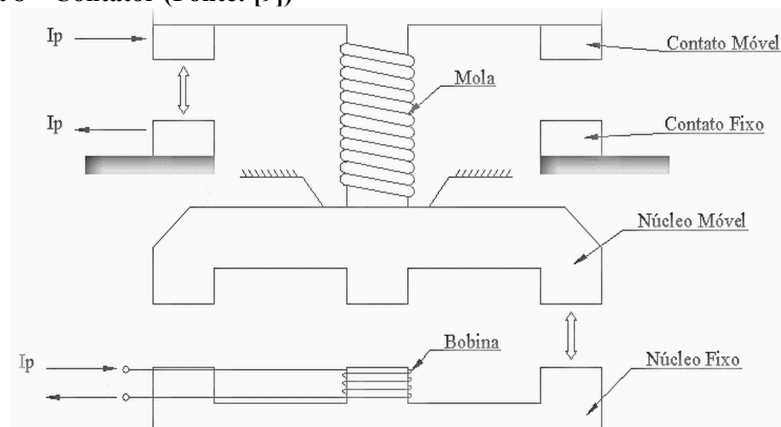
### 3.1. COMANDO

Os contadores, Figura 8, são elementos eletromecânicos que permitem o controle de elevadas correntes por meio de um circuito de baixa corrente [5]. É constituído por uma bobina que quando alimentada gera um campo magnético que atrai seu núcleo móvel e assim fecha o circuito. Quando há a interrupção dessa corrente, o núcleo móvel retorna a sua posição original por meio de molas, como pode ser observado na Figura 9.





**Figura 8 – Contator (Fonte: [9])**

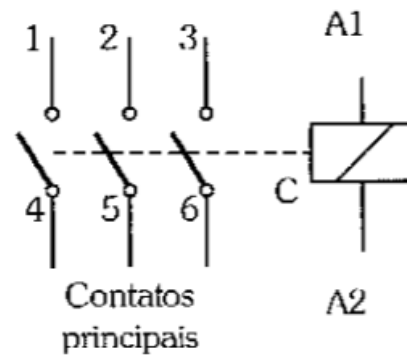


**Figura 9 - Esquema Funcionamento Contator (Fonte: [8])**

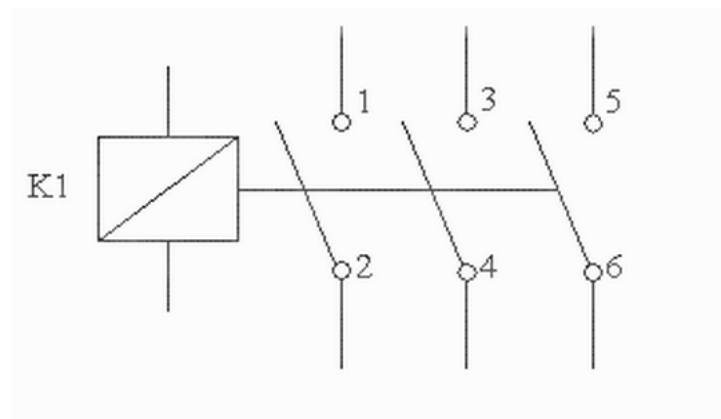
Os contadores pode ser utilizados em sistemas multifilares, ou seja, com mais de uma linha. Nos diagramas eles contém o símbolo da atuação eletromecânica que é o tracejado passando pelas chaves, observado na Figura 10 e Figura 12, ou apenas uma linha, Figura 11 e Figura 13. Os contadores normalmente são compostos por de três a cinco contatos. Ficam divididos entre os contatos principais e os contatos auxiliares.

Os contatos principais são mais robustos e suportam maiores correntes que dependem da carga que o motor acionará [8]. Os contatos auxiliares são utilizados para o comando e sinalização, por esse motivo são menos robustos que os principais já que esses sistemas demandam correntes menores. Nos comandos auxiliares existem contatos NF (Normalmente Fechado) e NA (Normalmente Aberto),

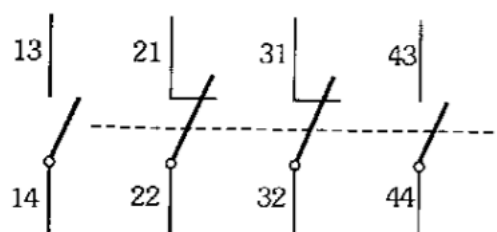
Figura 12 e Figura 13. Quando a parte eletromecânica é acionada, os contatos fechados abrem e os abertos fecham. Interrompendo o acionamento da parte eletromecânica, os contatos voltam a sua posição original.



**Figura 10 - Terminais principais de um Contator (Fonte: [5])**



**Figura 11 - Terminais principais contator (Fonte: [8])**



**Figura 12 - Terminais auxiliares de um contator (Fonte: [5])**

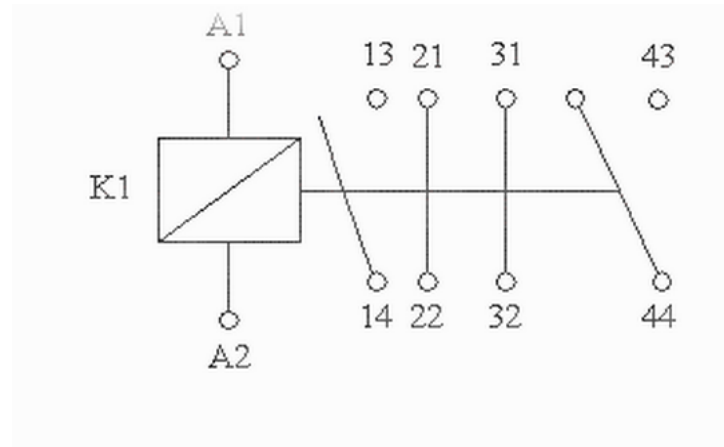


Figura 13 - Terminais auxiliares de um contator (Fonte: [8])

### 3.2. PARTIDA DIRETA

O método de partida direta consiste na utilização de contatores, disjuntores ou chaves interruptoras. É o método mais simples, em que não são utilizados dispositivos especiais de acionamento do motor. As fases do motor são ligadas diretamente ao motor.

Sempre que a instalação permitir, o tipo de partida deve ser direta, pois o motor estaria trabalhando na fixa de operação nominal, ou seja, corrente e tensão nominal [4]. Em quase todas as concessionárias de fornecimento de energia permite-se a partida direta para motores até 5 CV (3,73 kW) [6]. A NBR 5410 determina que para partidas, em geral, de motores acima dessa potência em instalações alimentadas diretamente pela rede de distribuição pública em baixa tensão, deve-se consultar a empresa distribuidora local [7].

#### 3.2.1. Equacionamento

Para se calcular a corrente de partida, deve-se primeiro calcular a corrente nominal. Para o seu cálculo é necessário se ter a potência ativa ( $P$ ) em watts, a tensão elétrica do sistema ( $V$ ) em Volts, o fator de potência do motor ( $\cos \varphi$ ) e o seu rendimento ( $\eta$ ). A corrente nominal ( $I_n$ ) é dada por:

$$I_n = \frac{P}{V\sqrt{3} \cos \varphi \eta} \quad (6)$$

A partir da corrente de partida, o motor terá em sua placa a informação  $I_p/I_n$ , que será o valor que representa quantas vezes a corrente de partida será maior que a corrente nominal. Então calculada a corrente nominal, basta multiplicá-la pelo valor da razão  $I_p/I_n$  e se obterá o valor da corrente de partida. Seu valor pode variar de 4 a 12 vezes [20].

$$\frac{I_p}{I_n} = x \quad (7)$$

$$I_p = xI_n \quad (8)$$

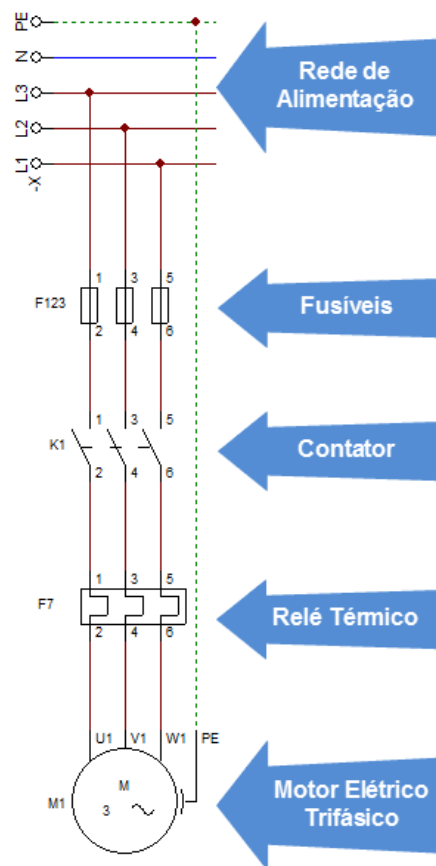
### 3.2.2. Esquema de Ligação

O diagrama de força da partida direta pode ser observada na Figura 14 enquanto que o diagrama de comando pode ser observado na Figura 15. No diagrama de força, Figura 14, a rede de alimentação é ligada no fusível. Do fusível é ligado no contator, cuja a função no caso é realizar o acionamento e desligamento (comando). Do contator é ligado no relé térmico, que a função é fazer a proteção em relação a temperatura e atuar antes que haja um sobreaquecimento do circuito desativando-o, e por fim liga-se do relé térmico no motor.

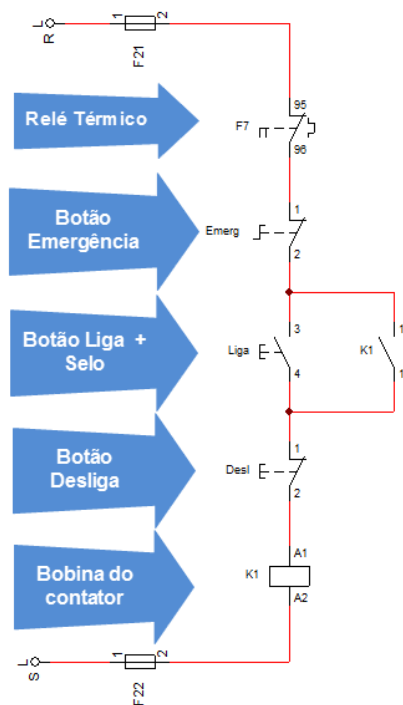
O relé térmico e o fusível são utilizados para a proteção do sistema. No caso do relé térmico, ou de sobrecarga, seu uso para a ligação não é necessário, mas em termo de proteção, junto com o fusível, é essencial para evitar sobreaquecimento que pode chegar a causar a queima de componentes ou até mesmo do motor, gerando grandes prejuízos. O aquecimento ocorre em função do efeito Joule da corrente sobre sensores bimetálicos [9]. O relé térmico não protege a linha em caso de curto-circuito, por isso ele é associado a fusíveis, que realizam essa proteção, promovendo então uma proteção completa da partida do motor.

O diagrama de comando, Figura 15, é feito, como o próprio nome diz, para comandar o circuito realizando operação de fechamento ou abertura do circuito ou ambas. No caso, ele realiza a partida direta e o desligamento do sistema em operação. Ao acionar o botão que liga, se fechará o circuito do contator 3-4, no qual passará corrente e fechará o circuito alimentando K1, e então alimentará o motor, e realizará a partida do mesmo. No contator, após acionamento, ele mesmo se manterá ligado, ou seja, é estabelecido um selo. Para desligá-lo aperta-se o botão desliga, que irá interromper a passagem de corrente, e no contator abrirá o circuito

alimentador e por consequência interromperá a passagem de corrente para o motor, e o mesmo será desligado.



**Figura 14 - Diagrama de Força Partida Direta (Fonte: [10])**



**Figura 15 - Diagrama de Comando Partida Direta (Fonte: [10])**

O motor parte com os valores de corrente e conjugado plenos, pois as bobinas do motor recebem tensão nominal. A corrente de partida é diretamente proporcional à tensão de alimentação e diminui à medida que a velocidade aumenta, Figura 5. O conjugado varia proporcionalmente ao quadrado da tensão de alimentação.

### 3.2.3. Vantagens e Desvantagens

O método de partida direta possui algumas vantagens que devem ser levantadas [4] [5]:

- Apresenta o menor custo de todas, por causa da única necessidade da fiação que o liga à rede, o que acaba representando o menor custo de todos os tipos de partida;
- Facilidade e simplicidade de implementação, causada em ligar o motor na direta;
- Alto torque de partida ou conjugado de partida elevado.

Suas desvantagens são:

- Alta corrente de partida, o que acaba provocando acentuada queda de tensão na rede de alimentação. Essa queda de tensão provocada acaba interferindo nos equipamentos ligados à rede.

- Existe a limitação, por parte da concessionária de energia elétrica, da queda de tensão;
- O valor alto da magnitude da corrente acaba causando um sobre dimensionamento dos cabos e contadores, que são calculados a partir dos valores das correntes, elevando os custos.

### 3.3. PARTIDA ESTRELA-TRIÂNGULO

Para instalações elétricas industriais podem ser usadas chaves estrela-triângulo para suavizar os efeitos de partida dos motores elétricos. O procedimento para o acionamento do motor é ligando-o inicialmente na configuração estrela até que o motor alcance uma velocidade próxima da velocidade de regime. Após esse momento é realizada a troca do tipo de ligação para o triângulo.

#### 3.3.1. Equacionamento

Como o motor funcionará em delta,  $V_{F\Delta}$  será a tensão nominal de funcionamento, a tensão da rede, Eq. (9). Lembra-se que na configuração delta, ou também chamada de triângulo, a tensão de fase é a mesma que a tensão de linha, e que para a ligação em estrela, a tensão de fase é  $\sqrt{3}$  menor que a de linha.

$$V_{F\Delta} = V_{L\Delta} = V_n \quad (9)$$

$$V_{LY} = \sqrt{3}V_{FY} \quad (10)$$

Ao se conectar no formato estrela e alimentando com a tensão da rede, as bobinas do motor ( $V_{FY}$ ) recebem aproximadamente 58%, Eq. (12), da tensão que deveriam receber.

$$V_{LY} = V_n = \sqrt{3}V_{FY} \quad (11)$$

$$V_{FY} = \frac{V_n}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}}{3} V_n = 0,58 \times V_n \quad (12)$$

Com os valores de tensão e corrente nominal na configuração delta, calcula-se a impedância. É válido lembrar que a corrente nominal é a corrente de linha.

$$I_L = I_n \quad (13)$$

$$I_F = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

$$V_{F\Delta} = I_{F\Delta} Z \quad (15)$$

$$Z = \frac{V_{F\Delta}}{I_{F\Delta}} = \frac{V_{F\Delta}}{\frac{I_{L\Delta}}{\sqrt{3}}} = \frac{\sqrt{3}V_{F\Delta}}{I_{L\Delta}} = \sqrt{3} \frac{V_n}{I_n} \quad (16)$$

Agora realizando-se a partida na configuração estrela, a tensão é reduzida em 58% em relação a nominal, como observado anteriormente, mas mantém-se o valor da impedância. Logo, tem-se que:

$$I_Y = \frac{\frac{V_n}{\sqrt{3}}}{Z} = \frac{\frac{V_n}{\sqrt{3}}}{\frac{\sqrt{3}V_n}{I_n}} = \frac{V_n}{\sqrt{3}} \frac{I_n}{\sqrt{3}V_n} \quad (17)$$

$$I_Y = \frac{I_n}{3} \quad (18)$$

Durante a partida em estrela, o conjugado e a corrente de partida ficam reduzidos a 1/3 de seus valores nominais [5], Eq. (18). Assim a corrente de partida é reduzida em 33,33%. Considerando-se que o conjugado do motor varia de forma quadrática com a tensão [4], o conjugado desenvolvido pode ser calculado através da E. (19) de acordo com Franchi [5], onde K é a constante do motor:

$$T = K.V^2 \quad (19)$$

$$T_{\Delta} = K.V_n^2 \quad (20)$$

Quando aplicada a partida em estrela, a tensão de fase é  $\sqrt{3}$  menor da de linha (nominal), então o conjugado de partida fica:



$$T_Y = K \cdot V_{F_Y}^2 \quad (21)$$

$$T_Y = K \cdot \left(\frac{V_n}{\sqrt{3}}\right)^2 = K \cdot V_n^2 \cdot \frac{1}{3} \quad (22)$$

$$T_Y = T_\Delta \cdot \frac{1}{3} \quad (23)$$

Comparando-se o conjugado de partida em estrela e em delta tem-se que o conjugado na partida em estrela fica reduzido em 1/3, Eq. (23) o que pode ser um ponto negativo. Observa-se que existe uma relação entre exponencial de segundo grau entre o conjugado e a tensão.

### 3.3.2. Esquema de Ligação

O diagrama de força e comando da partida  $Y - \Delta$  estão representados na Figura 16. Ao acionar o sistema de comando, através do botão  $SH_1$ , o temporizador  $KT_1$  é energizado, que através de seu contato 18-15, alimenta a bobina  $K_3$  que ao fechar monta a configuração estrela e energiza a bobina  $K_1$ , fechando o contato e energizando o sistema, realizando a partida na configuração estrela, Figura 17.

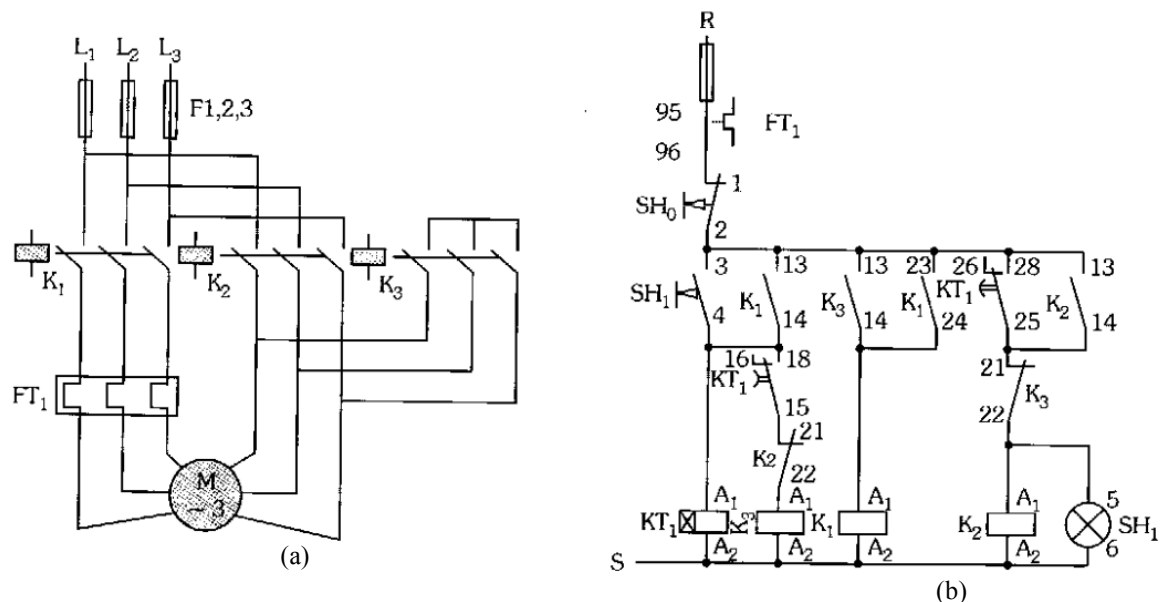
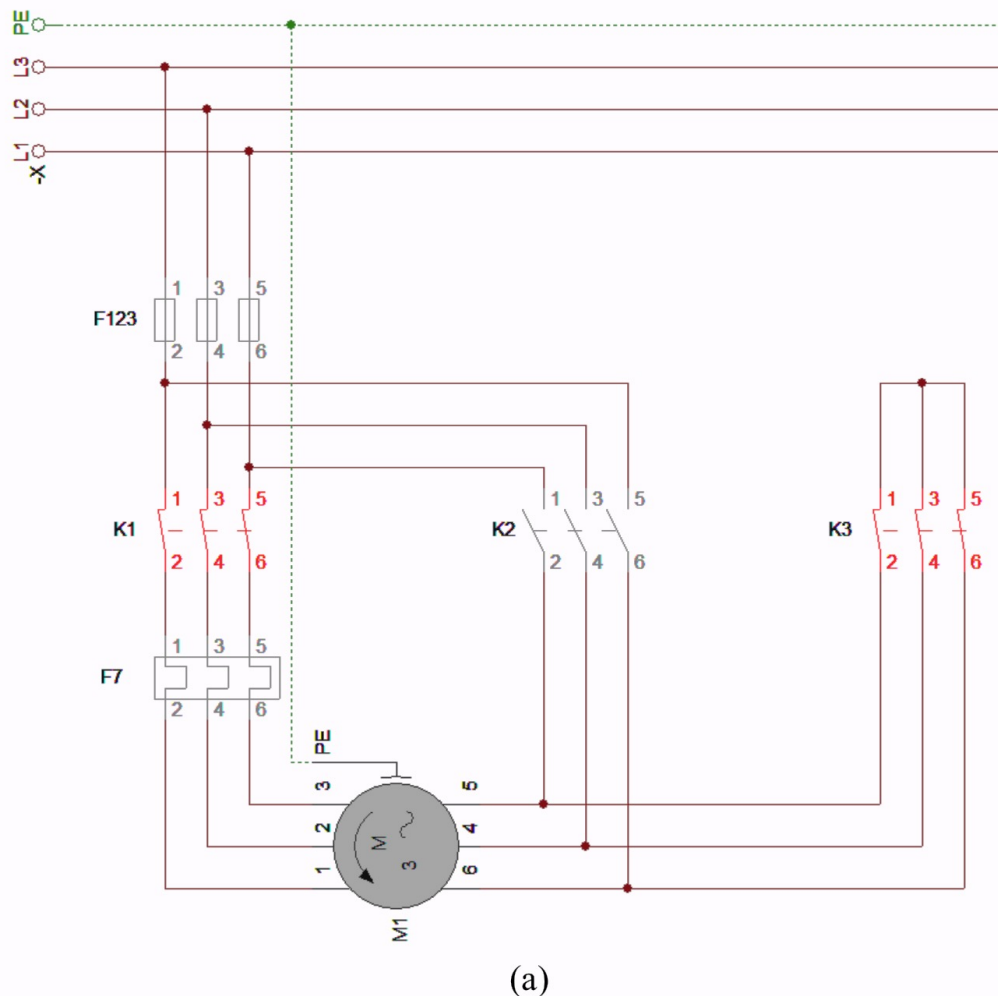


Figura 16 - Diagramas de Ligação Partida Estrela-Triângulo (Fonte: [5])

Nas Figura 17 e Figura 19, por mais que seja um diagrama de outra ligação para o mesmo tipo de partida, ele serve para explicar os estágios do método. Na Figura 17 se observa exatamente no diagrama de força, o primeiro estágio do método de partida. A configuração é a estrela, onde as bobinas  $K_1$  e  $K_3$  estão energizadas e fecham os contatos. A bobina  $K_3$  conecta os terminais de saída do

motor em um único ponto. A bobina  $K_1$  conecta o motor à rede de alimentação. No diagrama de comando, Figura 18, observa-se que  $K_1$  e  $K_3$  estão diretamente alimentados, o que os mantém ativados (permanecendo com contato fechado neste caso). Também é alimentado um temporizador  $D_1$ , que irá após um tempo determinado abrir seu contato interno, desenergizando  $K_3$ , e assim seus contatos mudarão de posição. Aqueles que estavam fechados ficarão abertos e os abertos ficarão fechados. Deste modo, ele fecha os pontos 11 e 12 de  $K_3$  na Figura 18 energizando  $K_2$ , que fecha os seus contatos abertos e abre os fechados, montando assim a configuração delta, Figura 19.



**Figura 17 - Diagramas de Força Partida Estrela-Triângulo na configuração Estrela (Fonte: [17])**

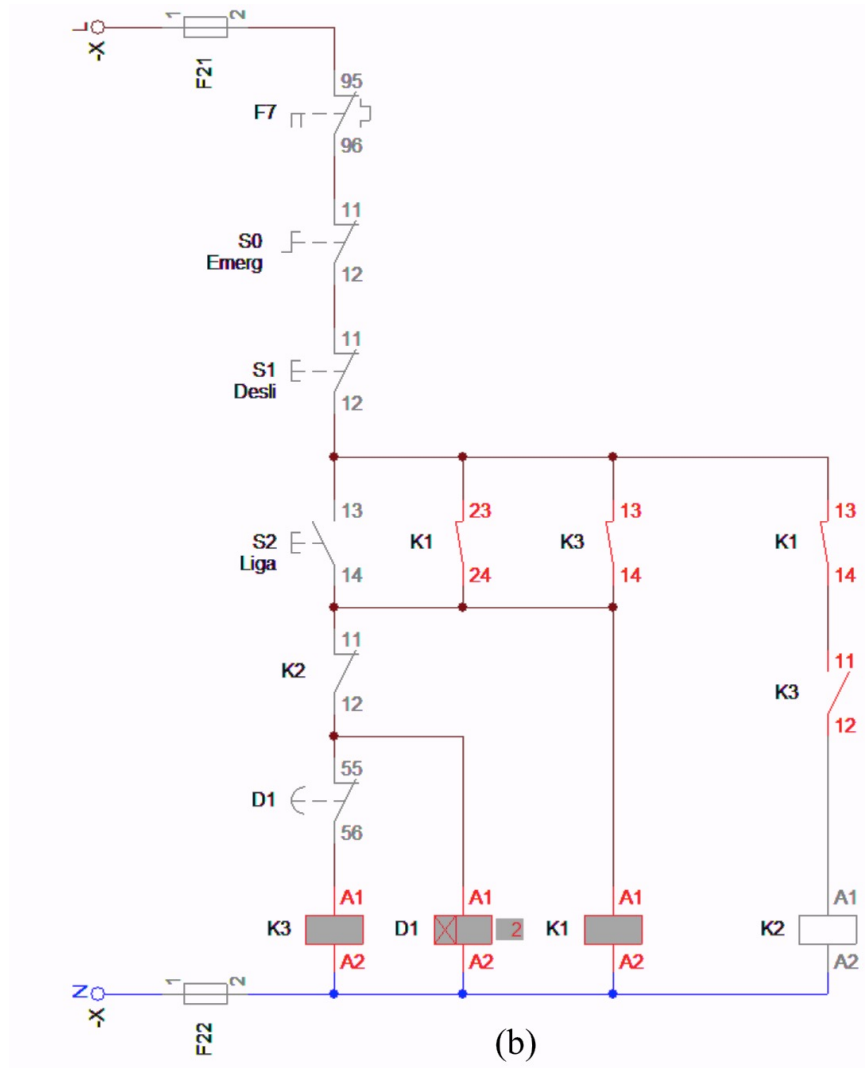


Figura 18 - Diagramas de Comando Partida Estrela-Triângulo na configuração Estrela (Fonte: [17])

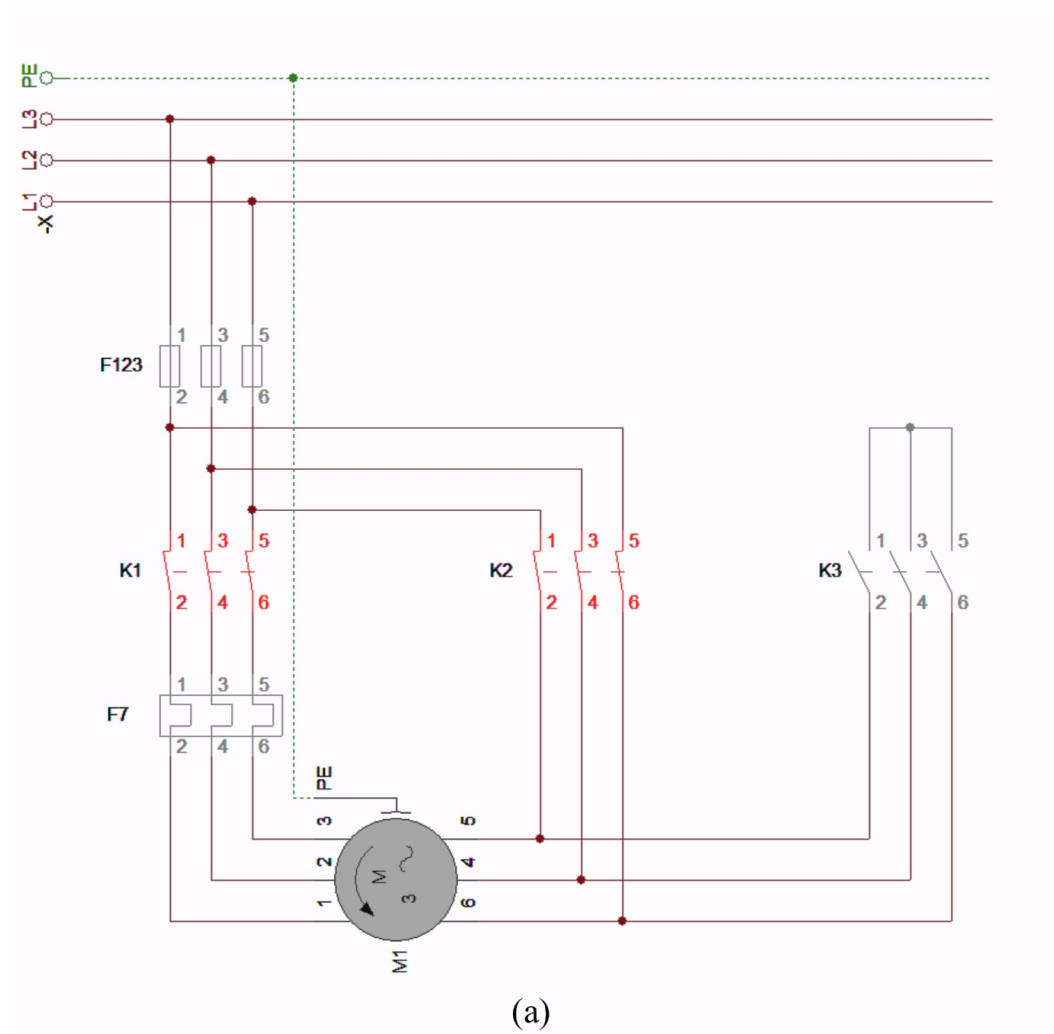
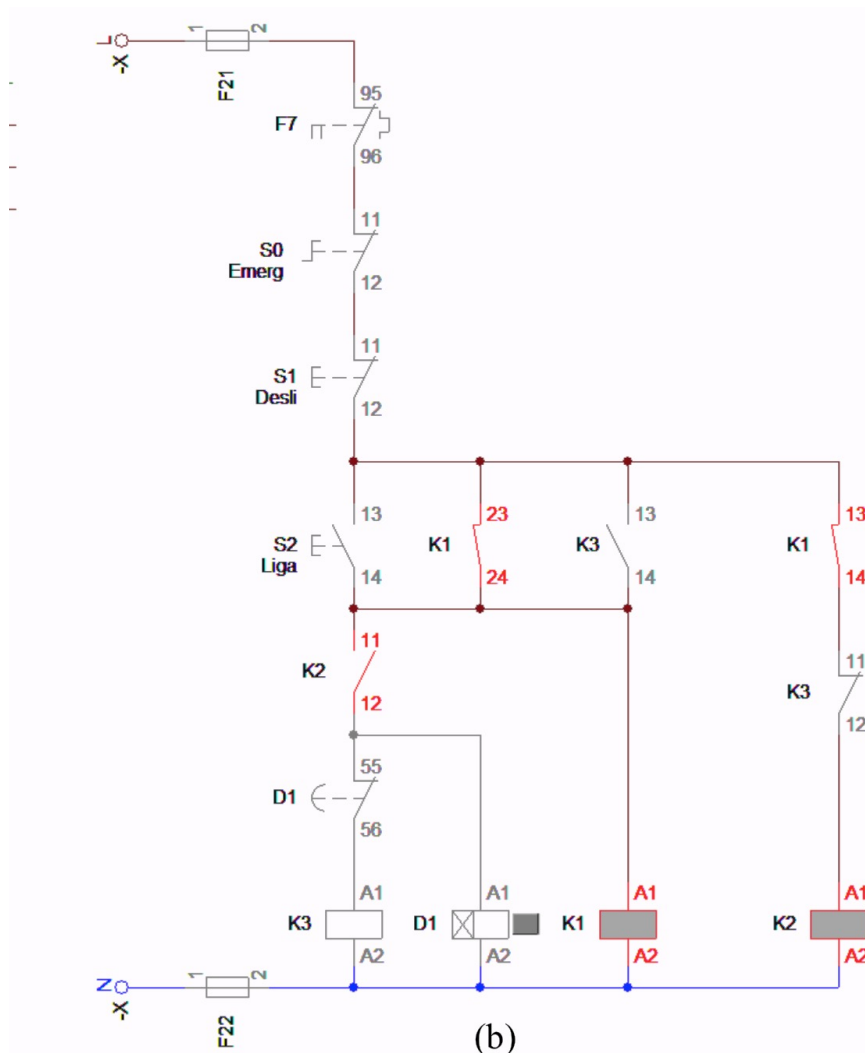


Figura 19 - Diagramas de Força Partida Estrela-Triângulo na configuração Triângulo (Fonte: [17])



**Figura 20 – Diagrama de comando partida estrela-triângulo na configuração triângulo (Fonte: [17])**

Na Figura 20, o Diagrama de comando, observa-se as mudanças ocorridas para que se armasse a configuração delta. A abertura proporcionada pelo temporizador  $D_1$  desenergizou  $K_3$ , realizando a troca de suas posições de suas ligações, assim houve o fechamento, após um tempo, no último ramo paralelo na Figura 20 do contato 11-12 e assim energizou-se  $K_2$ , realizando o fechamento na Figura 19 fazendo a mudança para configuração triângulo.

A passagem da ligação estrela para a triângulo é controlada pelo temporizador estrela-triângulo. O fechamento do contator triângulo se dá com um atraso de 30 a 100 ms (tempo fixo) para evitar um curto-circuito entre as fases, pois os contatores não podem ficar fechados simultaneamente [5].

Observa-se que  $K_1$  e  $K_2$  estão ligados e que  $K_1$  os mantém ligados, e que a ligação de  $K_1$  não foi alterada com a mudança. Para desligar o sistema, ou seja, o

motor, pressiona-se o botão  $S_1$  que irá interromper o contato 11-12 de  $S_1$ , interrompendo a alimentação de todo o sistema de comando, desligando o sistema de força.

Devido ao conjugado de partida baixo e relativamente constante a que fica submetido o motor, as chaves estrela-triângulo são mais adequadamente empregadas em motores a vazio, ou com pouca carga [4].

### 3.3.3. Vantagens e Desvantagens

A partida estrela-triângulo, assim como a direta possui os seus prós e contras. Pode-se elencar que pesam contra o método:

- Aplicação específica a motores com dupla tensão nominal e que disponham de pelo menos seis terminais acessíveis (6 *bornes*);
- Conjugado de partida reduzido a 1/3 nominal;
- A tensão de rede deve coincidir com a tensão em triângulo motor;
- O motor deve alcançar pelo menos 90% de sua velocidade de regime para que, durante a comutação, a corrente de pico não atinja valores elevados, que seriam atingidos caso fosse realizada a partida direta;
- Para grandes distancias entre o motor e a chave de partida, o custo aumenta devido a quantidade de cabos (6 cabos no mínimo).

As vantagens do método:

- Custo reduzido em relação à chave compensadora;
- Elevado número de manobras que podem ser efetuadas;
- Corrente de partida reduzida a 1/3 da nominal;
- Baixas quedas de tensões durante a partida;
- Mais adequados para motores a vazio ou de baixo conjugado;
- Dimensões relativamente reduzidas.

## 3.4. PARTIDA DE CHAVE COMPENSADORA

A partida de chave compensadora é composta basicamente de um autotransformador com várias derivações [4], mais comumente chamadas de TAP's, destinadas a regular o processo de partida, Figura 21. Essas derivações são terminais encontrados ao longo dos enrolamentos do autotransformador, nos pontos onde as tensões são, normalmente, 50%, 65% e 80% da tensão aplicada na fase [5].



**Figura 21 – Autotransformador Trifásico (Fonte: [16])**

Assim pode-se escolher com qual porcentagem da tensão da rede o motor será acionado, atendendo de melhor forma as necessidades de partida do MIT. A corrente fica reduzida em função da aplicação da tensão menor que a nominal nos terminais do motor [5]. O mesmo ocorre com o conjugado por consequência direta. Ou seja, o conjugado e a corrente de partida ficam reduzidas por fatores correspondentes ao *TAP* escolhido [5].

Este autotransformador é ligado ao circuito do estator. O ponto estrela do autotransformador fica acessível, e no momento da partida ele é curto-circuitado, sendo o mesmo desfeito (aberto) antes do motor ser ligado à rede (tensão plena). Depois ele é ligado à tensão plena e o autotransformador é desligado. Esse tipo de partida é comumente utilizado em motores de alta potência, acionando cargas com alto índice de atrito [4], geralmente motores acima de 15 cv [5].

### **3.4.1. Equacionamento**

Por causa do autotransformador, é necessário que se leve em conta suas relações de transformação, dispostas nas Eq. (23). Normalmente se usa a relação de transformação da Eq. (23), mas para a didática se utilizará a da Eq. (31).

$$\frac{V_{entrada}}{V_{saída}} = \frac{N_{entrada}}{N_{saída}} = \alpha \quad (23)$$

O torque de partida é dado pela Eq. (24). Agora o torque de partida nominal será dado pela Eq. (25) e o torque pela partida compensadora será representado pela Eq. (27). Relembrando que  $V_n = V_{entrada}$ , que é a tensão da rede.

$$T = K \cdot V^2 \quad (24)$$

$$T_{p(n)} = K_{p(n)} \cdot V_n^2 \quad (25)$$

$$T_{p(n)} = K_{p(n)} \cdot V_{entrada}^2 \quad (26)$$

$$T_{p(c)} = K_{p(c)} \cdot V_{saída}^2 \quad (27)$$

$$T_{p(c)} = K_{p(c)} \cdot \left( \frac{V_{entrada}}{a} \right)^2 \quad (28)$$

$$T_{p(c)} = K_{p(c)} \cdot V_{entrada}^2 \cdot \left( \frac{1}{a} \right)^2 \quad (29)$$

$$T_{p(c)} = \left( \frac{1}{a} \right)^2 T_{p(n)} \quad (30)$$

Didaticamente, é mais fácil explicar adotando a relação de transformação de forma inversa.

$$\frac{V_{entrada}}{V_{saída}} = \frac{N_{entrada}}{N_{saída}} = \frac{1}{\beta} \quad (31)$$

$$T_{p(n)} = K_{p(n)} \cdot V_{entrada}^2 \quad (32)$$

$$T_{p(c)} = K_{p(c)} \cdot V_{saída}^2 \quad (33)$$

$$T_{p(c)} = K_{p(c)} \cdot (\beta \cdot V_{entrada})^2 \quad (34)$$

$$T_{p(c)} = K_{p(c)} \cdot V_{entrada}^2 \cdot \beta^2 \quad (35)$$

$$T_{p(c)} = \beta^2 T_{p(n)} \quad (36)$$

Ao se comparar os 2 resultados, Eq. (36) e Eq. (37), observa-se que eles são os mesmos, Eq. (38) mas a segunda abordagem é de mais fácil compreensão.



$$T_{p(c)} = \left(\frac{1}{a}\right)^2 T_{p(n)} = \left(\frac{1}{\frac{N_{entrada}}{N_{saida}}}\right)^2 \cdot T_{p(n)} = \left(\frac{N_{saida}}{N_{entrada}}\right)^2 \cdot T_{p(n)} \quad (37)$$

$$T_{p(c)} = \beta^2 T_{p(n)} = \left(\frac{N_{saida}}{N_{entrada}}\right)^2 \cdot T_{p(n)} \quad (38)$$

A relação de transformação será exatamente os *TAP's* escolhidos. Assim os valores de conjugados compensados ficarão reduzidos em relação ao conjugado nominal numa relação ao quadrado dos *TAP's*. Abaixo a Tabela 2 demonstra a relação entre os conjugados para os *TAP's* mais comuns.

**Tabela 2 - Conjugados de acordo com os *TAP's* de autotransformadores comerciais (Fonte: [5])**

<b>TAP de transformação (<math>\beta</math>)</b>	<b><math>\beta^2</math></b>	<b>Percentual de conjugado nominal</b>
0,5	0,25	25%
0,65	0,4225	42,25%
0,8	0,64	64%

O autotransformador trabalha a redução da corrente de duas formas [12]:

- Reduz a corrente de partida do motor pela redução da tensão;
- Pela reação de espiras do autotransformador, no qual a corrente de linha do primário é menor que a corrente do secundário do motor.

Tem-se então a redução das tensões aplicadas de acordo com a derivação do transformador para o *TAP* 65% que reduz para 42% o valor da partida direta e o *TAP* 80% que reduz para 64% o valor da partida direta [5]. A corrente do último *TAP* mencionado se aproxima do valor de acionamento da corrente quando utilizado a chave estrela-triângulo [4].

### **3.4.2. Esquema de Ligação**

O diagrama de força e o diagrama de comando estão representados na Figura 22 e Figura 23. Os diagramas de comando são muito parecidos, havendo apenas a mudança de alguns símbolos, da posição de dois elementos e a falta de sinalização luminosa de funcionamento. Da Figura 22 pode-se retirar principalmente do diagrama de força a representação do *TAP* estabelecido.

Ao se pressionar o botão de acionamento  $S_1$ , irá energizar o contator  $K_3$  que será armado, fechando o contato principal, abrindo seus contatos auxiliares 11-12 e fechando os contatos auxiliares 13-14, que irão energizar  $K_2$  que fechará todos os seus contatos. Quando  $K_2$  fechar, será criado o selo que irá manter  $K_2$  e  $K_3$  energizados e irá ativar o temporizador  $KT_1$ . A representação deste momento ocorre na Figura 26.

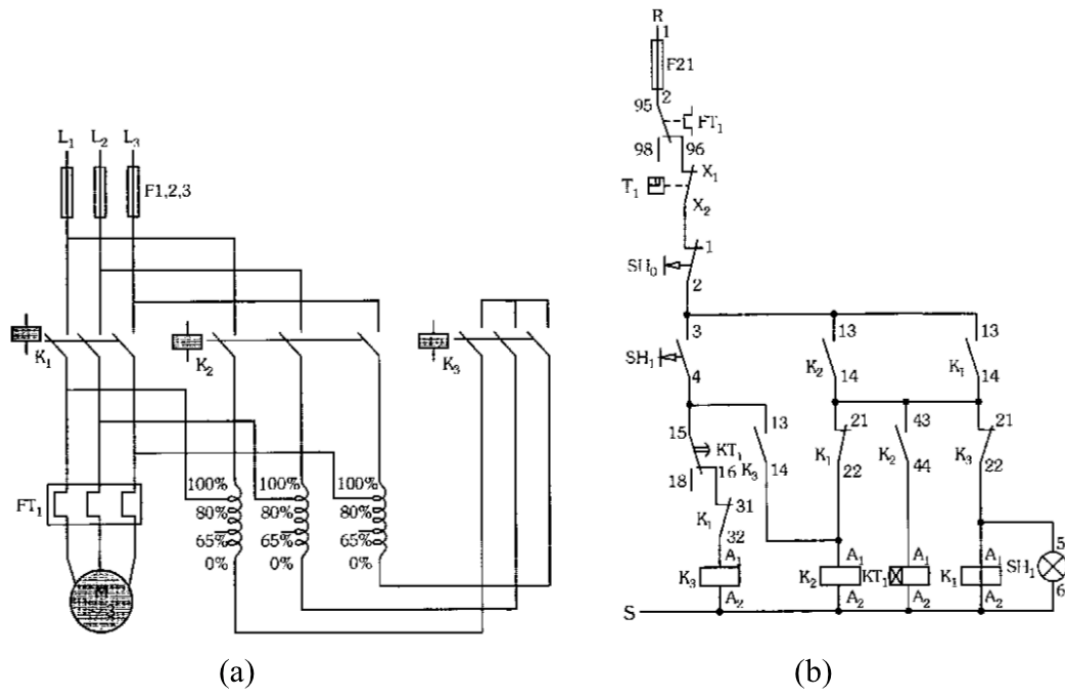


Figura 22 - Diagrama de força (a) e comando (b) da Chave Compensadora (Fonte: [5])

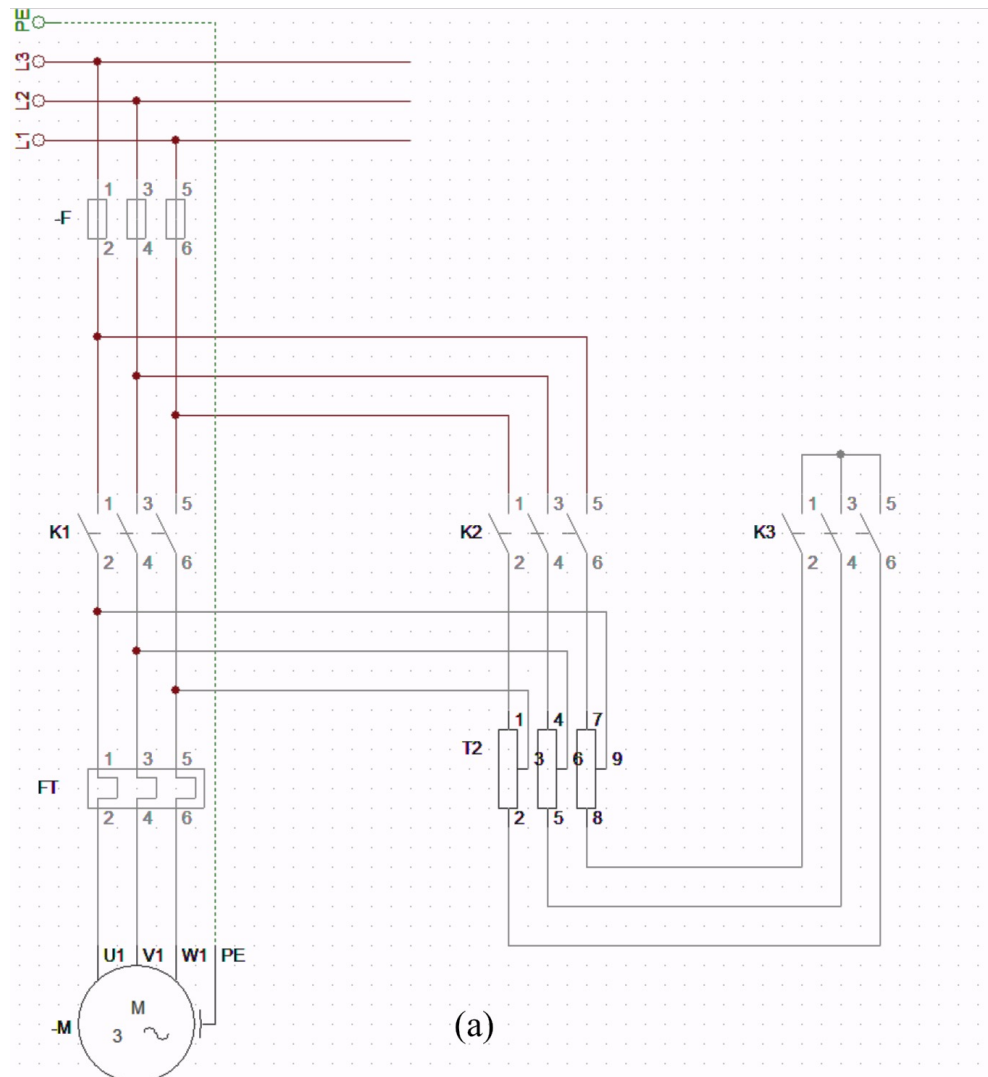


Figura 23 - Diagrama de Força da Chave Compensadora (Fonte: [16])

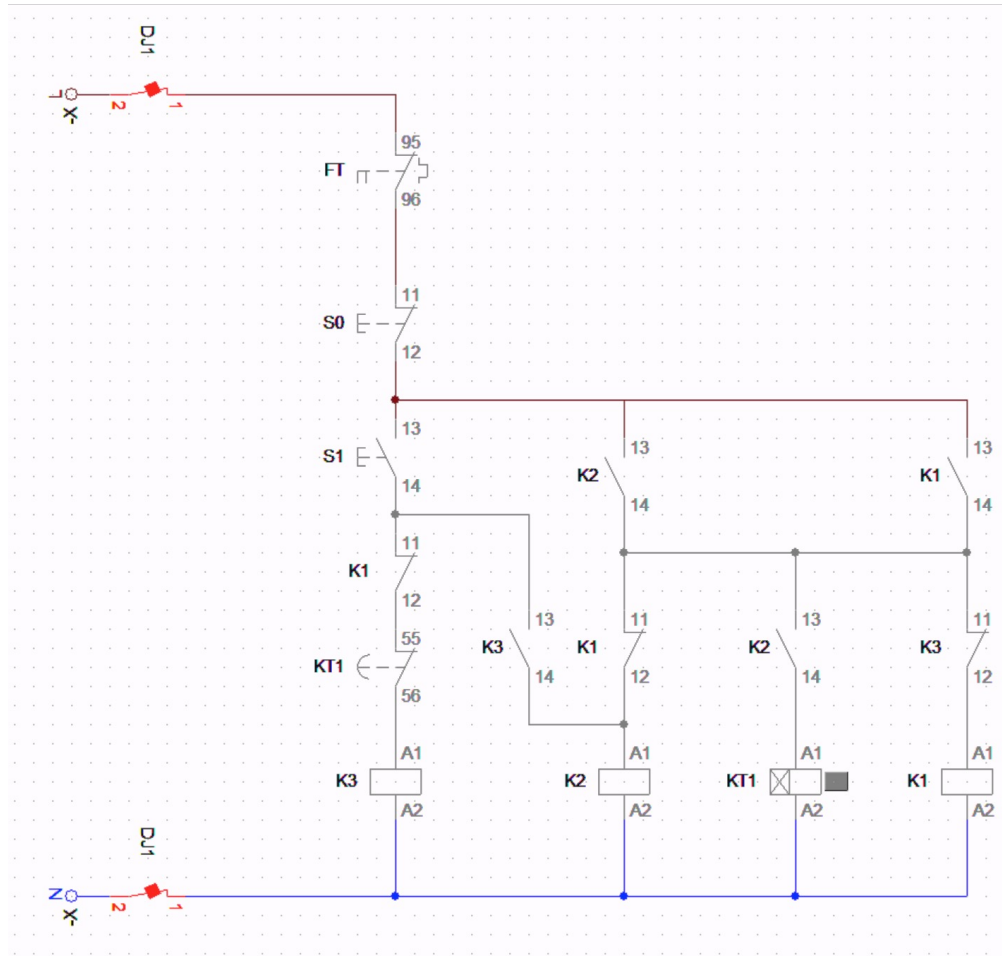


Figura 24 - Diagrama de comando da chave compensadora (Fonte: [16])

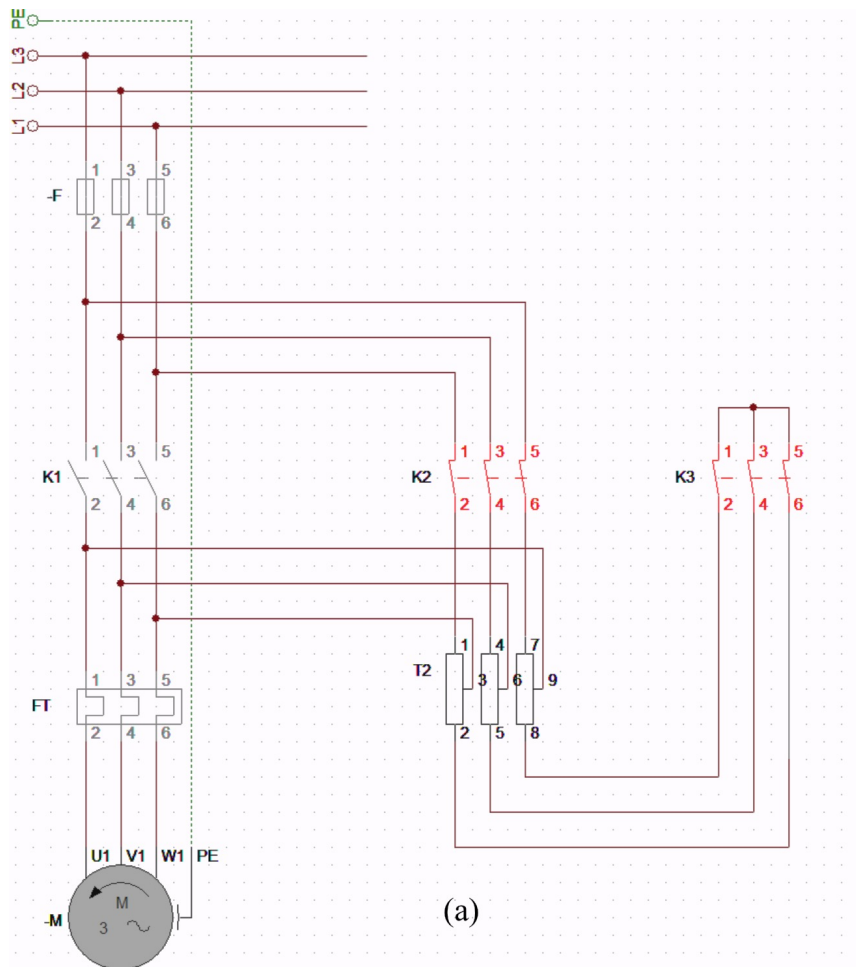


Figura 25 - Diagrama de força da chave compensadora acionada (Fonte: [16])



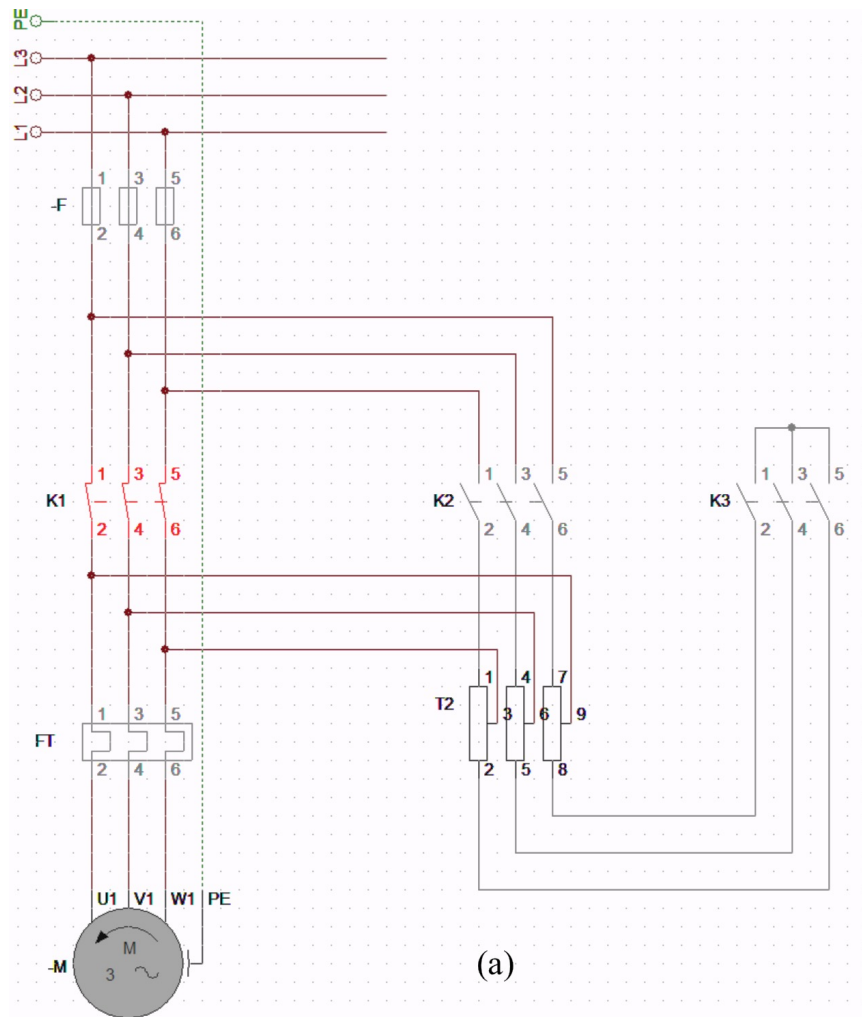


Figura 27 - Diagrama de força da chave compensadora desarmada (Fonte: [16])

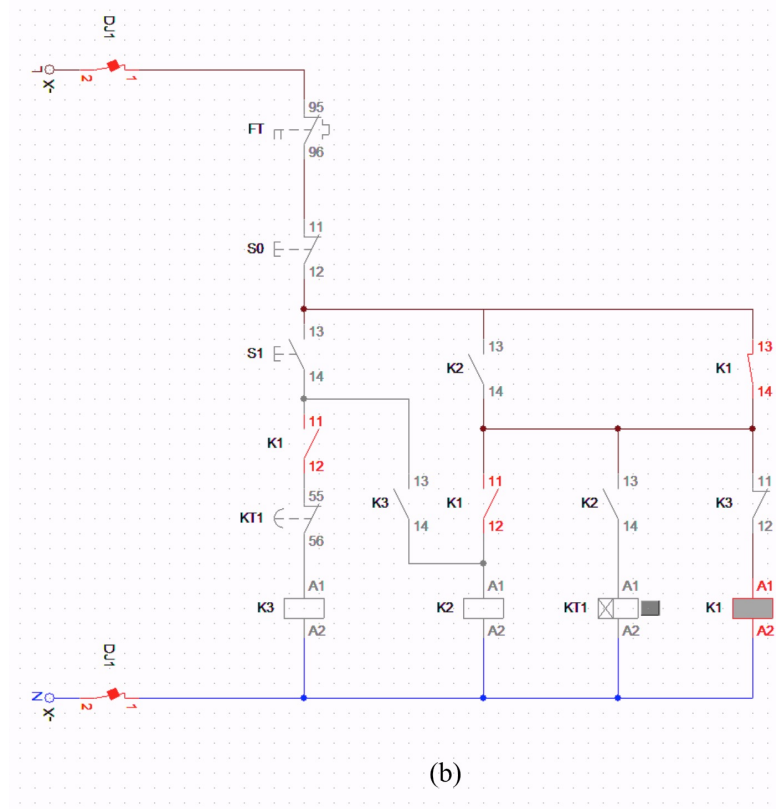


Figura 28 - Diagrama de comando da Chave Compensadora desarmada (Fonte: [16])

### 3.4.3. Vantagens e Desvantagens

Assim como os anteriores, a partida compensadora possui as suas vantagens e desvantagens [4] [5]. As vantagens são:

- Na derivação 65% a corrente de partida na linha se aproxima do valor da corrente de acionamento, utilizando chave estrela-triângulo. O valor da tensão da rede pode ser igual a tensão da ligação estrela ou triângulo do motor;
- O autotransformador impede a variação da corrente, mesmo quando há a diminuição da tensão reduzida para a tensão de suprimento;
- A chave, graças as variações gradativas do tape, consegue se adequar à capacidade do sistema de suprimento, desde que dentro dos seus parâmetros de atuação;
- A partida com cargas, onde se varia o *TAP* de acordo com a exigência da carga;
- Na comutação do *TAP* de partida para a tensão da rede, o motor não é desligado.
- O motor somente necessita de três *bornes* externos.



Em contraponto, as desvantagens são:

- O custo maior que o custo da chave estrela-triângulo em função do autotransformador;
- As dimensões são maiores que as da chave triângulo-estrela, logo ocupam mais espaço;
- Limitação de manobras.

### 3.5. PARTIDA *SOFT-STARTER*

É uma técnica muito utilizada, e também conhecida por partida estática. Ao contrário dos anteriores não é um tipo de partida direta ou indireta, mas sim eletrônica. Seu princípio de funcionamento consiste na utilização de um conjunto de pares de tiristores na configuração anti-paralela ou combinações de tiristores/diodos para cada fase do motor [4].

De acordo o Módulo 2 das aulas de Eletrônica de Potência da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp [13]:

Um tiristor consiste num conjunto de dispositivos semicondutores que operam em regime chaveado, tendo em comum uma estrutura de 4 camadas semicondutoras numa sequência p-n-p-n, apresentando um funcionamento biestável. O tiristor mais difundido é o Retificador Controlado de Silício (*SCR*). [13]

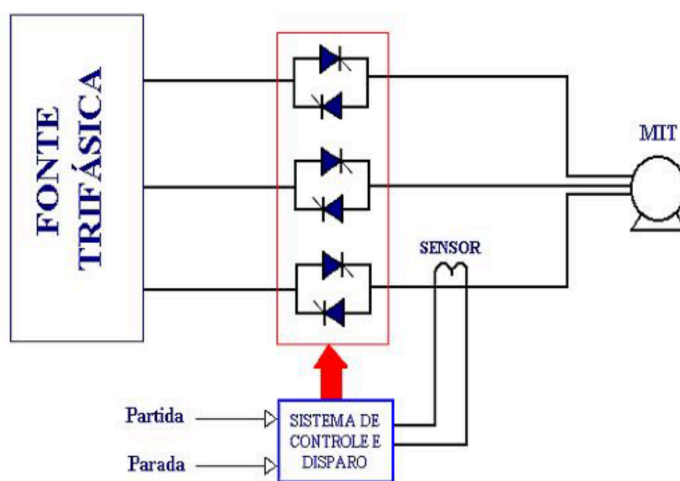
Esse tipo de partida é utilizada a fim de controlar a corrente de partida de motores trifásicos de corrente alternada, tanto quanto para frenagem. Assegura a aceleração e desaceleração progressivas, permitindo uma adaptação da velocidade às condições de operação [5]. O *Soft-Starter* é um equipamento capaz de controlar a potência do motor durante a partida e frenagem, ao contrário dos sistemas convencionais utilizados [14].

O *Soft-Starter* controla a tensão variando o ângulo de disparo dos mesmos, o ângulo de condução dos tiristores (ângulo de condução das tensões que alimentam o motor [14]), e logo variando a tensão aplicada ao motor, o que acaba controlando a corrente que passa no motor, que por sua vez influi uma partida suave do motor

[4]. Por esse motivo, que o tipo de partida é chamada de *Soft-Starter*, que em tradução livre do inglês, significa: “partida suave”.

### 3.5.1. Princípio de Funcionamento

Seu princípio de funcionamento está baseada de uma ponte tiristorizada na configuração antiparalelo, que é comandada por uma placa eletrônica de controle [5], como pode ser observado na Figura 29. Este esquema é formado por dois circuitos: Potência e Controle.



**Figura 29 - Esquema *Soft-Starter* (Fonte: [9])**

O circuito de potência é constituído basicamente pelos SCRs e pelos TCs. Os TCs fazem o monitoramento da corrente de saída, permitindo o sistema de controle efetuar a proteção e manutenção do valor da corrente nos níveis determinados [5]. O circuito de controle é onde ficam os componentes e circuitos de comando, monitoramento, proteção, sinalização, interface homem/máquina. A maioria das chaves *soft-starter* é microprocessada, sendo totalmente digital [5].

### 3.5.2. Rampa de Tensão na Aceleração

Por proporcionar uma partida suave, o método acaba evitando quedas bruscas de tensão na rede de alimentação, já que ele exige gradativamente da rede. Isso ocorre pois se diminui os picos de corrente gerados pela inércia da carga mecânica [14], o que permite uma partida sem golpes.

A subida progressiva da tensão pode ser controlada pela rampa de aceleração, Figura 30.

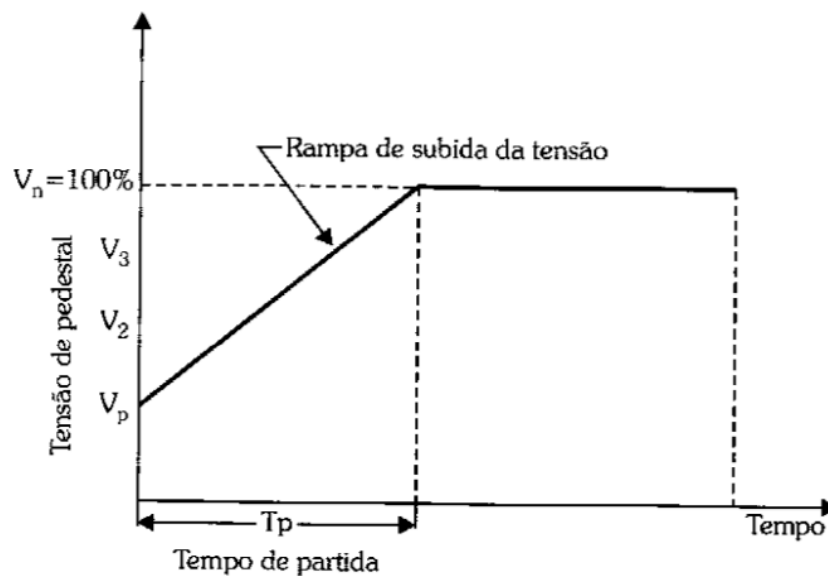


Figura 30 - Rampa de aceleração *Soft-Starter* (Fonte: [5])

As chaves de partida podem ser ajustadas no módulo de tensão, de forma a se ter uma tensão inicial de partida ( $V_p$ ) adequada responsável pelo torque inicial que irá acionar a carga. Ao se ajustar  $V_p$  e um tempo de partida  $T_p$ , a tensão cresce do valor  $V_p$  até atingir a tensão de linha do sistema, no intervalo  $T_p$ . [4]

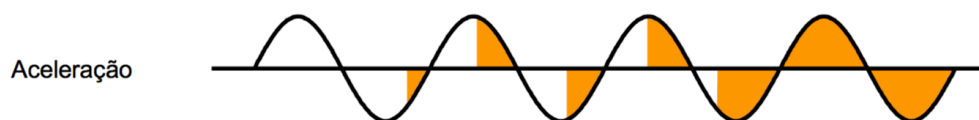


Figura 31 - Variação de tensão no motor na aceleração por *Soft-Starter* (Fonte: [9])

Desta forma a onda de tensão aplicada no motor fica igual a Figura 31. Ela começa em uma parte, e aos poucos vai crescendo até chegar na tensão nominal, que seria a onda completamente preenchida da cor laranja.

Como resultado dessa rampa de aceleração o pico da corrente é menor, como pode ser observado na Figura 32, do que a partida direta, e assim como na rampa de tensão, a corrente vai crescendo e depois do pico se iguala a corrente de partida.

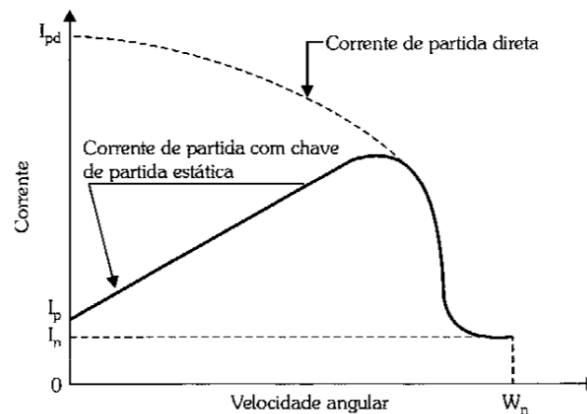


Figura 32 - Comparação Corrente x Velocidade *Soft-Starter*/Partida Direta (Fonte: [5])

### 3.5.3. Rampa de Tensão na Desaceleração

Assim como existe o acionamento do motor, aceleração, também é possível realizar uma parada suave reduzindo a tensão, de forma similar que é feita na rampa de aceleração. Neste caso institui-se a tensão no valor que o motor inicia sua desaceleração [4], chamada de tensão de desaceleração  $V_d$ . Essa tensão vai reduzir gradativamente em um determinado tempo de desaceleração determinado ( $T_d$ ) até que o motor pare de girar. Assim se forma a rampa de desaceleração, Figura 33.

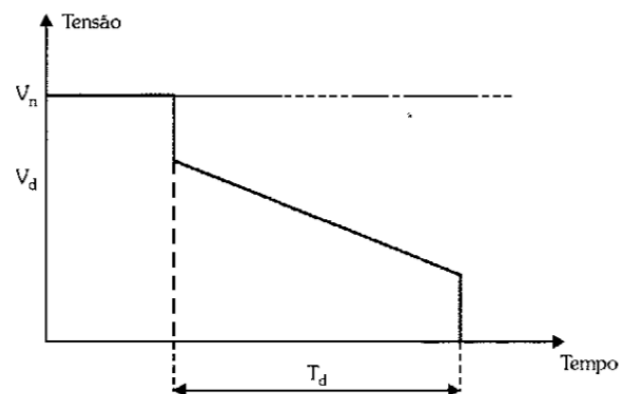


Figura 33 - Rampa de desaceleração *Soft-Starter* (Fonte: [5])

Neste momento retira-se a tensão dos terminais do motor. O tempo de desligamento  $T_d$  pode ser ajustado, em geral, de 1 a 20 segundos, sendo  $V_d$ , em geral, igual a 90% da tensão nominal ([4], [5]). O tempo  $T_d$  irá depender da necessidade da instalação. Com *softwares* pode-se obter tempos de desligamento de 1.000 s [4].

Outra forma de parada do sistema é a retirada da alimentação e o motor irá parar por inércia, que pode causar solavancos e paradas bruscas. Uma vantagem

da parada via *soft-starter* é que com a diminuição da tensão, perde velocidade, diminuindo a carga acionada, e pode-se proporcionar uma parada suave mecanicamente. Em aplicações industriais, as paradas bruscas podem causar danos ao produto final, como em esteiras transportadoras de garrafas de refrigerante [5].

#### 3.5.4. Kick-Start

Os *soft-starters* possuem uma função chamada de *Kick Start*. Sua finalidade é fazer o ajuste para que cargas de inércia muito elevadas possam ter o processo de partida iniciados, pois elas exigem um esforço extra do acionamento em função do alto conjugado resistente. O *Kick Start* é um pulso de tensão de partida com um valor ajustável.

Essa função faz com que seja aplicado ao motor um pulso de tensão com amplitude e duração programáveis para que o motor tenha conjugado de partida suficiente para vencer o atrito e acelerar a carga [5]. Na prática, o pulso, representado na Figura 34, deve ser ajustado entre 75% e 90% da tensão do sistema e o tempo ajustado entre 100 e 300 ms [4]. Existem casos que esse ajuste pode ser maior [4]. Sua utilização só deve ocorrer quando for estritamente necessário, pois no momento que é usada, a atuação da limitação da corrente é eliminada, e a partir desse momento o sistema pode sofrer elevadas quedas de tensão durante o período do pulso.

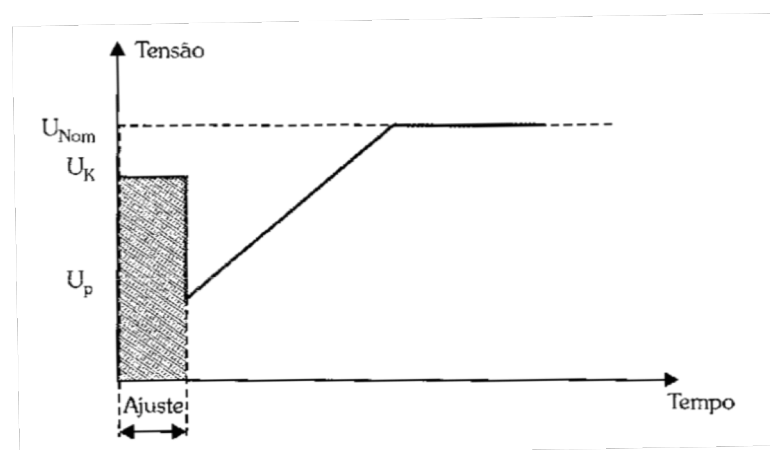


Figura 34 - *Kick Start* (Fonte: [5])

### 3.5.5. Limitação de Corrente

A limitação de corrente, Figura 35, é outra função do *soft-starter*. Ela faz com que o sistema forneça ao motor somente a corrente necessária para que seja executada a aceleração da carga [5]. Desse modo ela garante um acionamento suave.

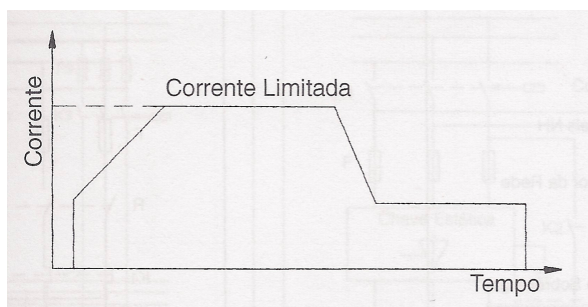


Figura 35 - Limitação de corrente *Soft-Starter* (Fonte: [4])

O *soft-starter* não tem seu uso restrito para partida de motores. Ele ainda trabalha como proteção e quando ele atua, emite uma mensagem de erro correspondente para o usuário [5]. Ele atua como proteção de sobrecorrente imediata na saída, subcorrente imediata e ainda podem ter outras proteções dependendo do fabricante.

### 3.5.6. Economia de Energia Elétrica

A maioria dos *soft-starters* modernos tem um circuito de economia de energia. Essa facilidade reduz a tensão aplicada para motores a vazio, diminuindo as perdas no entreferro, que são a maior parcela de perda nos motores com baixas cargas [14], ou reduzem em motores com carga reduzida.

A chave tem uma função que otimiza o ponto operacional do motor, minimizando as perdas de energia reativa, fornecendo apenas energia ativa requerida pela carga [5]. A função de economia é aplicada com motores nessa situação por um longo período de tempo. Isso é feita mediante a redução da tensão fornecida nos terminais do motor durante o tempo que está com carga vazia ou reduzida [4]. Uma economia significativa pode ser experimentada para motores que operam com cargas de até 50% da potência do motor [5], durante um período de operação superior a 50% do tempo de funcionamento do motor [4]. Entretanto, essa função gera correntes harmônicas indesejáveis na rede, devido a abertura do ângulo de condução para diminuição da tensão [5]. A Figura 36 ilustra isso.

Otimização p/  
Carga Parcial  
( economia de  
energia )

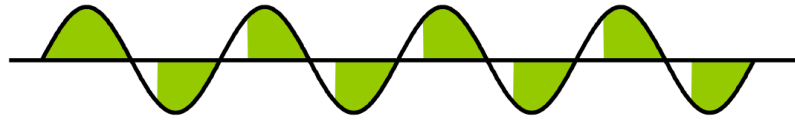


Figura 36 - Economia de energia por *Soft-Starter* (Fonte: [14])

Cabe lembrar, entretanto, que o *soft-starter* não melhora o fator de potência, e também gera harmônicos, como qualquer outro dispositivo de acionamento estático [14].

### 3.5.7. Formas de Ligação

As chaves de partida estáticas podem ser ligadas de diferentes formas:

#### a) Ligação direta

Também conhecida como ligação normal, o motor é ligado diretamente ao *soft-starter*. Essa ligação pode ser direta ou com utilização de dispositivos como contatores, fusíveis e relés de sobrecorrente. Seu diagrama de força é representado na Figura 37.

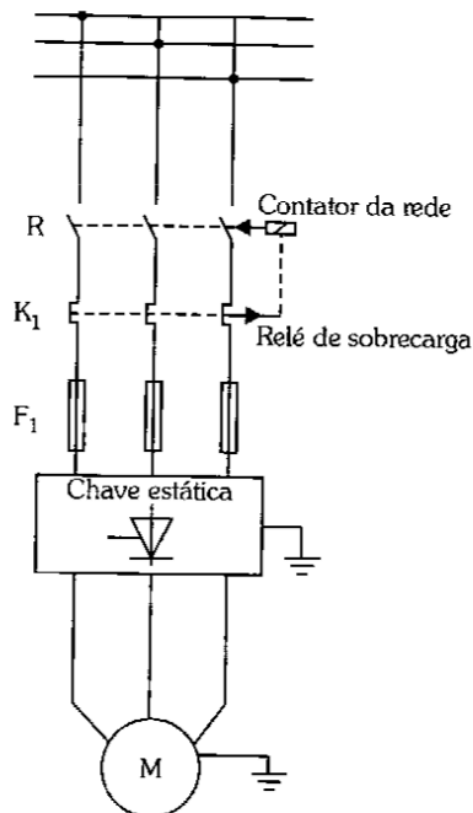


Figura 37 - Ligação direta *Soft-Starter* (Fonte: [5])

#### b) Ligação com contator em paralelo

Visando à redução de perdas por aquecimento em operação nominal, é recomendado utilizar um contator em paralelo, como indica a Figura 38.

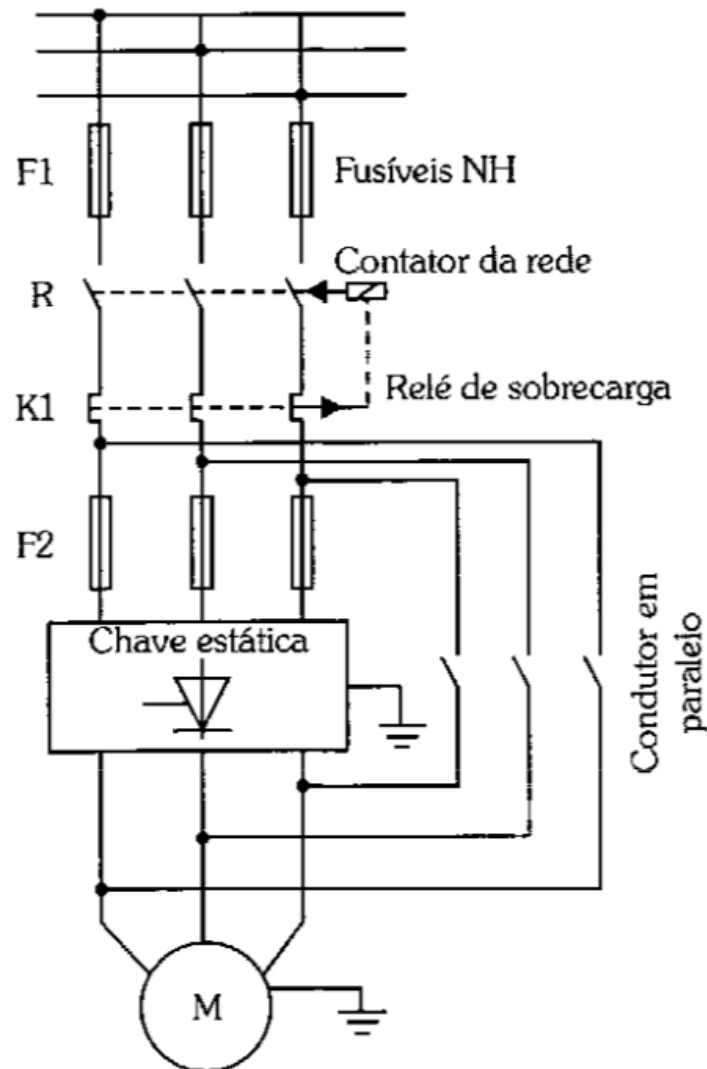


Figura 38 - Ligação contator em paralelo (Fonte: [5])

#### c) Ligação em partida sequencial de diversos motores

A mesma chave pode acionar vários motores. Se eles forem de mesma potência e característica de carga, utiliza-se o mesmo ajuste. Se forem diferentes, devem-se ajustar os parâmetros para cada tipo de motor, que pode ser feito via *software* entre a chave e o computador [4]. A Figura 39 representa o esquema desse tipo de ligação.



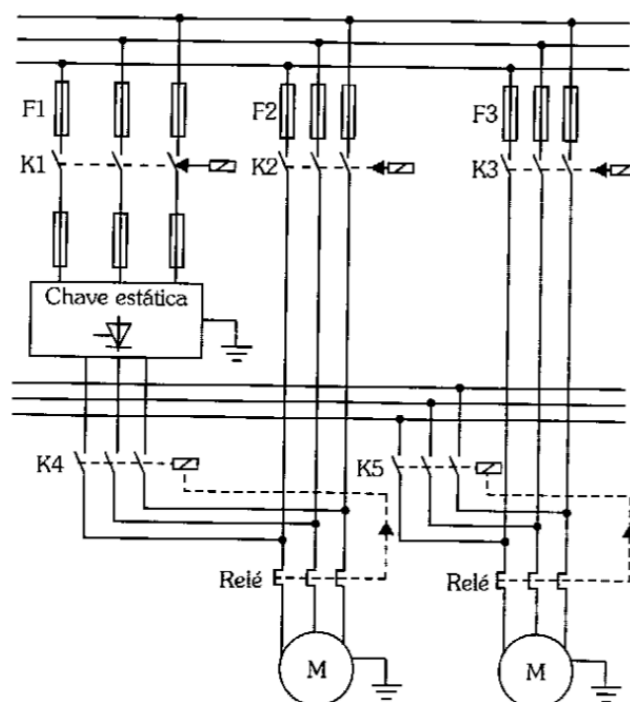


Figura 39 - Ligação Sequencial de vários motores via *soft-starter* (Fonte: [5])

d) Ligação simultânea de diversos motores

A capacidade da chave deve ser maior ou igual à soma das potências de todos os motores. Com ilustração, pode-se observar o esquema básico de ligação na Figura 40.

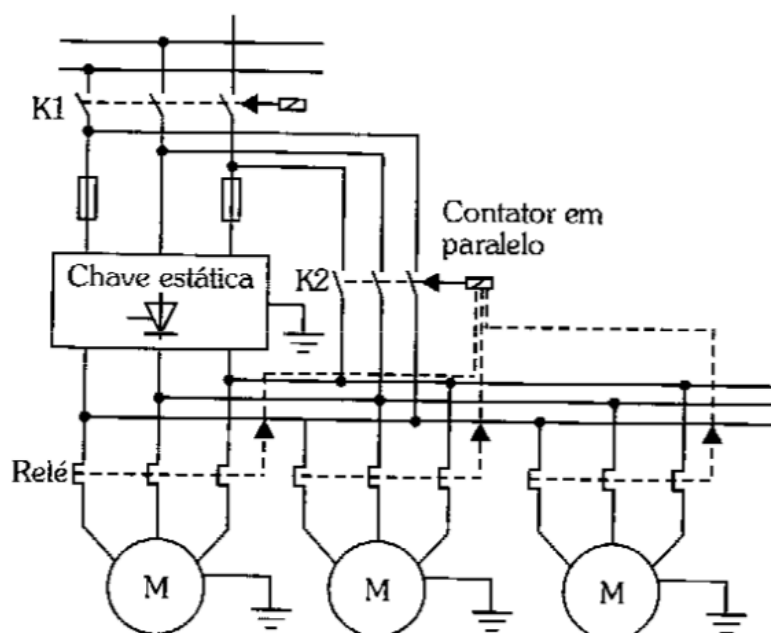


Figura 40 - Ligação simultânea de vários motores via *soft-starter* (Fonte: [5])

A chave *soft-starter* possui um determinado número de entradas e saídas digitais e analógicas. As saídas podem ser parametrizadas para comando (liga-desliga), controle, sinalização. As tensões de operação dessas saídas dependem do fabricante. A Figura 41 representa um diagrama de comando da chave.

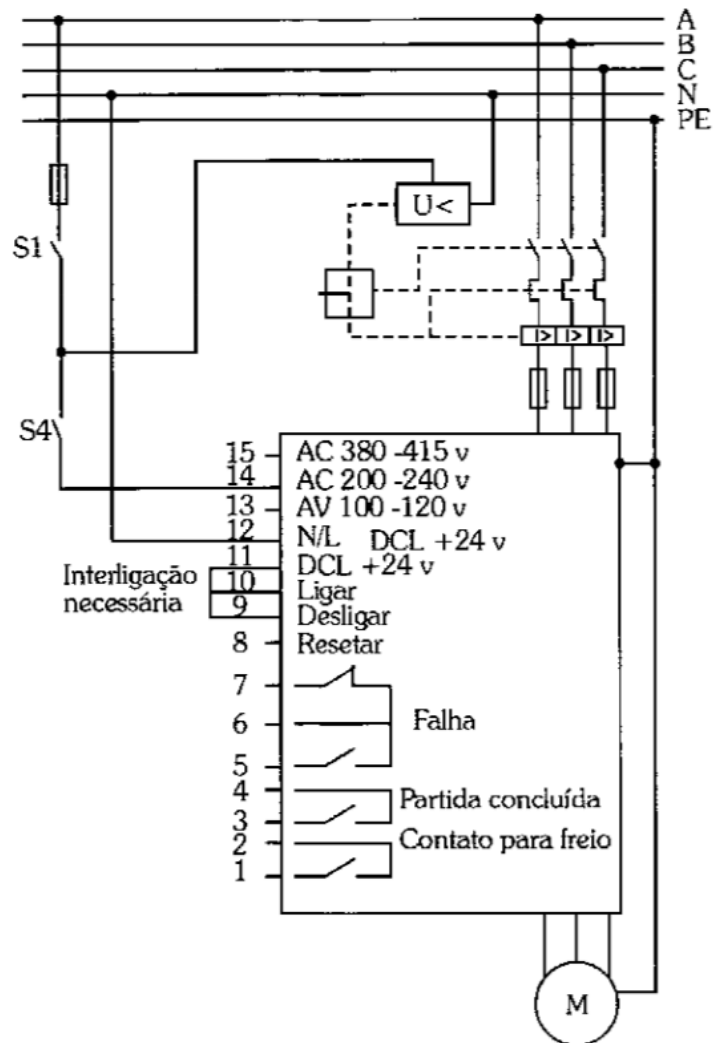


Figura 41 - Diagrama de comando *soft-starter* (Fonte: [5])

### 3.5.8. Vantagens e Desvantagens

Todo esse aparato apresenta um maior custo na medida que a potência do motor é reduzida, o que é a desvantagem. As vantagens são [12]:

- Longa vida útil, pois não possuem partes móveis. Acaba aumentando a vida útil dos componentes e acessórios como contadores, fusíveis e outros;

- Não gera arco elétrico;
- Não possui limitação de manobra;
- Torque próximo do torque nominal;
- Realiza partida e frenagem do motor (para motores de baixa inércia)

## 4. MODELAGEM DOS MÉTODOS DE PARTIDA UTILIZANDO O MATLAB

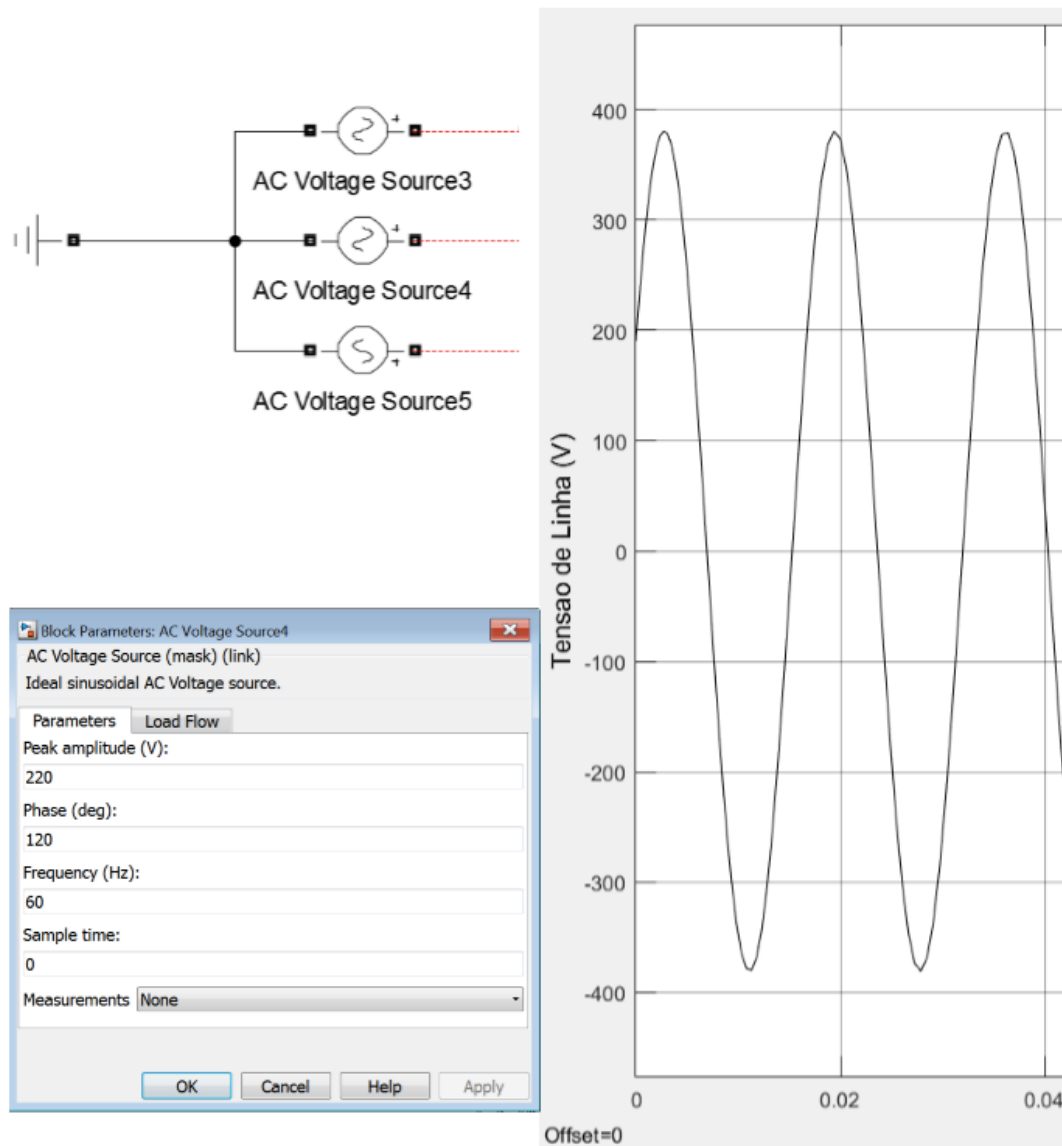
A modelagem consistiu na montagem dos circuitos no programa *Simulink* do *Matlab*. Cada tipo de partida possui seus próprios componentes, por causa das suas características, e por isso eles diferem entre si. A modelagem do sistema não é igual ao que é apresentado nos diagramas de força e comando. Mas vai se assemelhar ao diagrama de força.

### 4.1. 4.1 ELEMENTOS UTILIZADOS

Para a modelagem foram utilizados fontes, medidores de tensão e corrente trifásicos e monofásicos, um motor assíncrono, a constante, o *bus selector* e o ganho.

#### 4.1.1. Fonte

Para a fonte há duas opções. A fonte a ser utilizada é de escolha do montador do modelo. A fonte de tensão de corrente alternada não é trifásica em sua essência, logo necessita-se de 3 fontes para alimentar uma carga trifásica. A tensão fornecida depende do modo como se conectarão as fontes. Sendo ligada com um ponto neutro em comum aterrado, como na Figura 42, ela estará na configuração estrela e fornecerá um valor de  $V\sqrt{3}$  de tensão de linha, sendo  $V$  a tensão determinada nas configurações da fonte. Nessa fonte se especifica e se obtém valor em rms, ou seja, na forma de onda, o valor do pico da onda o valor demonstrado é em rms. No caso da figura foi especificado um valor de 220V na fonte, logo por estar em estrela, a tensão de saída é  $220\sqrt{3}V = 381V$ , como observa-se no gráfico da figura.



**Figura 42 - Fonte trifásica de 220V composta por fontes de tensão alternada**

A outra opção é a fonte trifásica programável, Figura 43. Por ser trifásica só se necessita de uma. Nesta fonte se especifica o valor em rms, mas o valor que sai da fonte é em valor de pico, ou seja, na forma da onda o valor máximo (do pico) é  $V\sqrt{2}$ . Então, ao simular uma fonte que conceda tensão para uma carga conectada em estrela, deve-se especificar o valor de  $V\sqrt{3}$ , que, por consequência, sairá com valor de  $V\sqrt{3} \times \sqrt{2} = V\sqrt{6}$ . Na Figura 43 o valor especificado foi de  $220\sqrt{3}V$ , logo a tensão de saída observada no gráfico foi de  $220\sqrt{6}V = 538V$ . A vantagem da fonte de tensão trifásica programável é que se pode programar para que ela varie a amplitude, a fase ou a frequência da tensão fornecida e o momento, a ser escolhido pelo programador, em que isso irá acontecer.

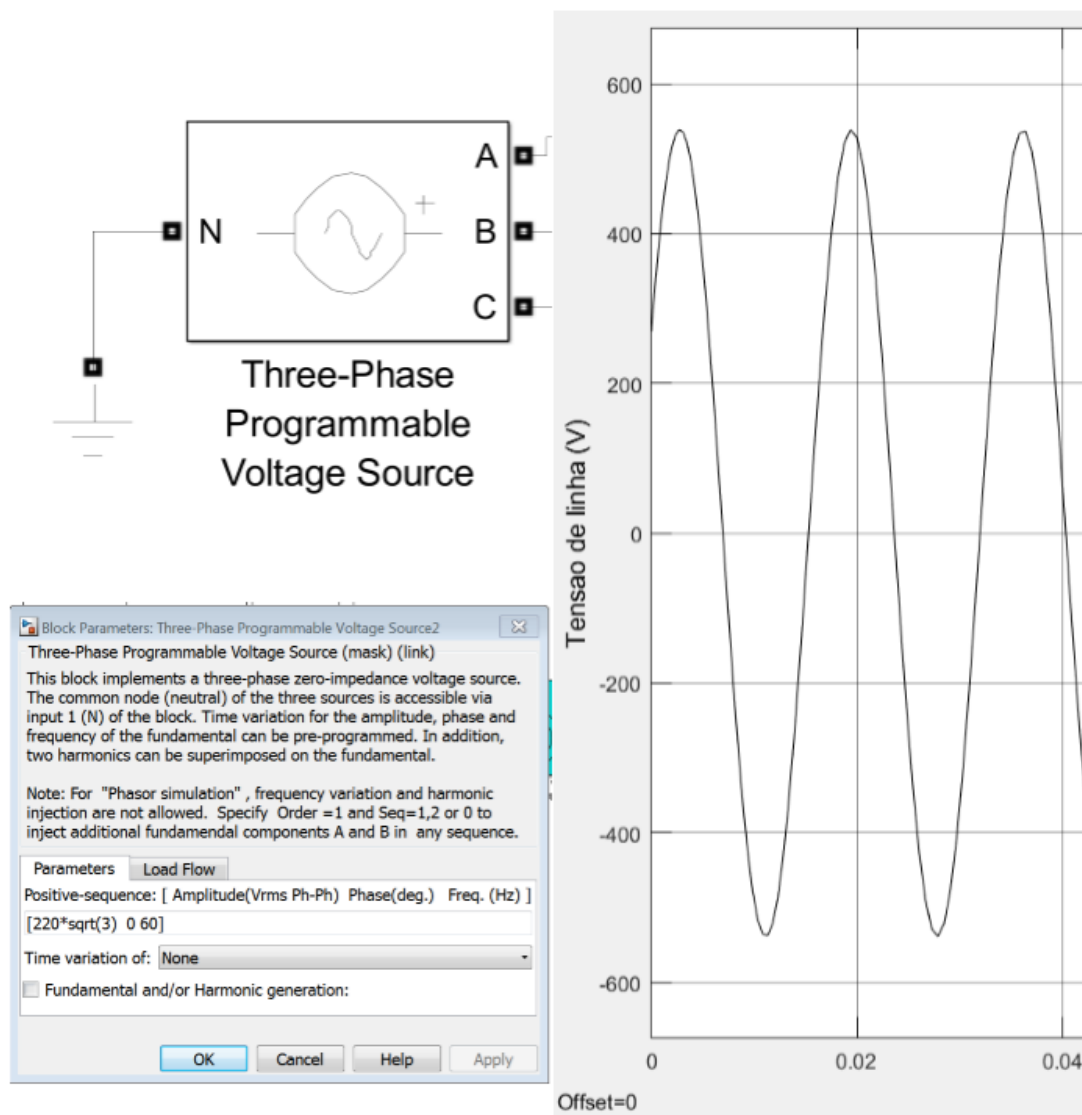


Figura 43 - Fonte trifásica programável de 220V

#### 4.1.2. Medidores de tensão e corrente

O medidor trifásico, Figura 44, serve para medir as tensões de fase ou de linha e as correntes que passam pelas 3 fases. Nas suas configurações, se seleciona se a leitura da voltagem será fase-terra ou fase-fase. Para o trabalho foi escolhida a opção de entre fase.

Os medidores de corrente e de tensão presentes na Figura 45 servirão nas comparações das tensões e correntes na chave compensadora. A ligação desses instrumentos segue a lógica dos instrumentos físicos, para a voltagem instrumento ligado em paralelo ao sistema e para a corrente em série.

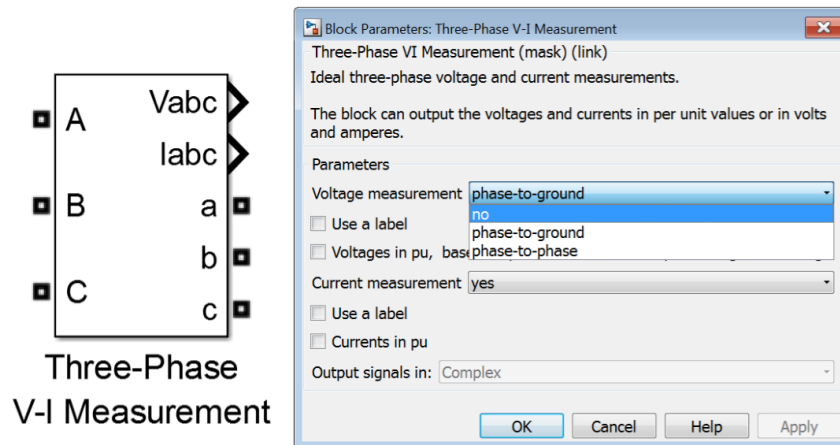


Figura 44 - Medidor trifásico de corrente e tensão

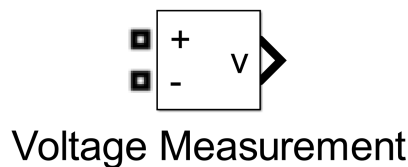
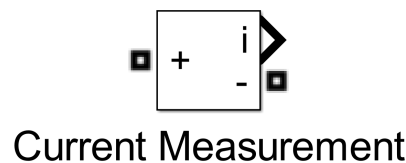


Figura 45 - Medidores de corrente e tensão

#### 4.1.3. Motor

O motor assíncrono é modelado através de várias configurações, Figura 46. Primeiramente pode-se escolher seu tipo, gaiola de esquilo (*squirrel-cage*) ou rotor bobinado (*wound*). Nas configurações ainda se pode escolher um motor pré-definido pelo *Matlab* ou especificando-o na aba parâmetros. Nesta aba, especifica-se a potência do motor, frequência e tensão de operação, as impedâncias internas do motor, podendo-se escolher se as unidades estão no sistema de unidades internacional ou em pu.

Ainda na aba de configurações, também se pode escolher o que vai entrar pela porta de entrada mecânica, símbolo  $T_m$  na Figura 48. No caso do trabalho foi torque. Se o torque for positivo, a máquina estará funcionando como motor, e se for negativo, a máquina estará funcionando como gerador. A entrada mecânica representa a carga. O motor assíncrono no *Matlab* tem seus enrolamentos conectados em estrela ligados internamente por um neutro.

Na aba parâmetros estão especificados todos os parâmetros do motor, como potência, tensão, frequência, resistência de enrolamento do estator e rotor,

indutância equivalente do rotor e estator, indutância mútua, a inércia, o fator de fricção e o número de polos do motor.

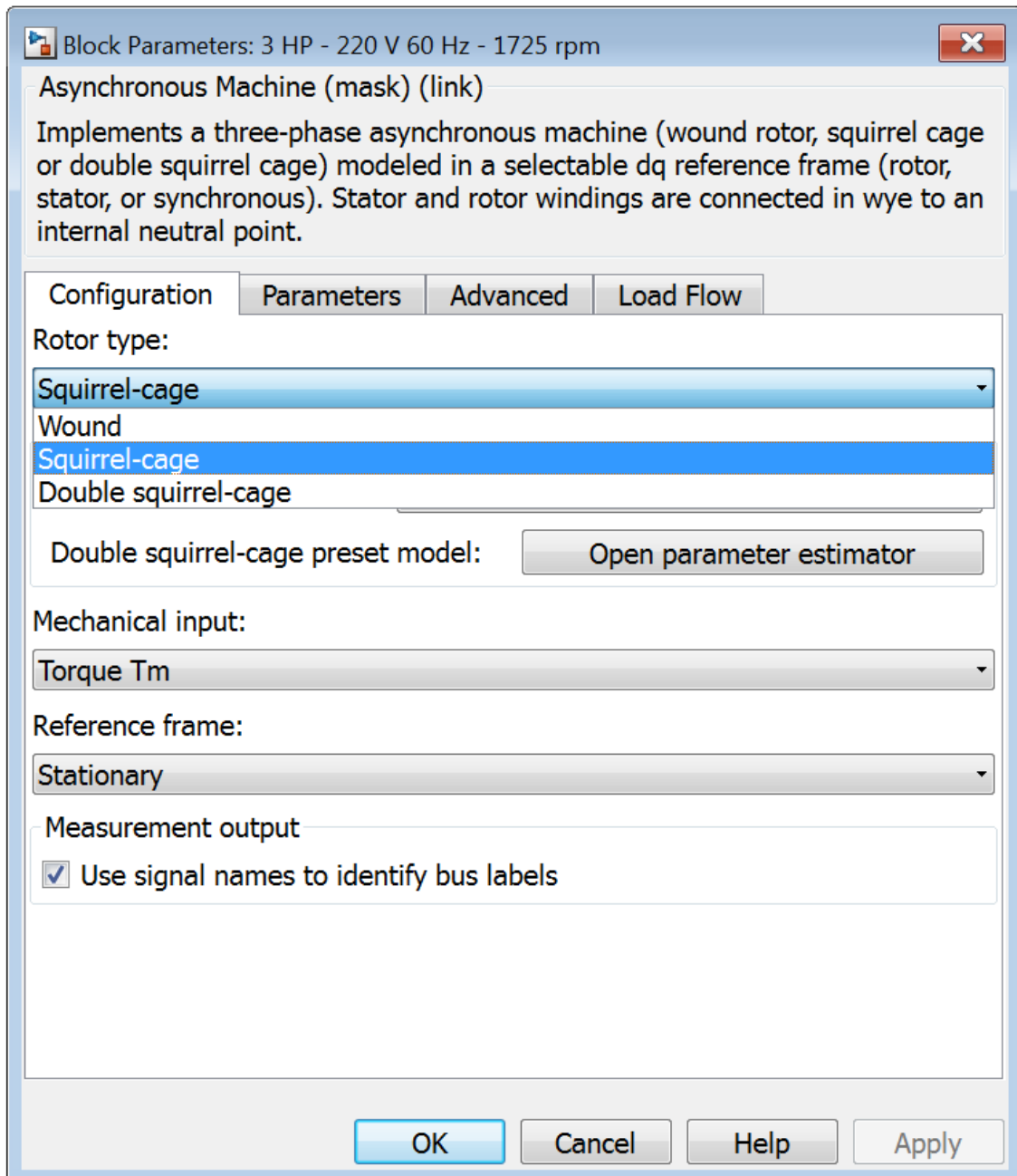


Figura 46 - Configurações do motor

Block Parameters: 3 HP - 220 V 60 Hz - 1725 rpm2

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Advanced Load Flow

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [ Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz) ]:

[ 3\*746, 220, 60 ]

Stator resistance and inductance [ Rs(ohm) Lls(H) ]:

[ 0.435 2\*2.0e-3 ]

Rotor resistance and inductance [ Rr'(ohm) Llr'(H) ]:

[ 0.816 2.0e-3 ]

Mutual inductance Lm (H):

69.31e-3

Inertia, friction factor, pole pairs [ J(kg.m^2) F(N.m.s) p() ]:

[ 0.089 0 2 ]

Initial conditions

[ 1,0 0,0,0 0,0,0 ]

☐ Simulate saturation Plot

[ i(Arms) ; v(VLL rms) ]: 3.7778367 ; 230, 322, 414, 460, 506, 552, 598, 644, 690

OK Cancel Help Apply

Figura 47 - Configurações internas do motor

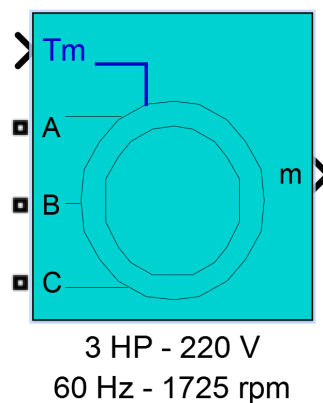


Figura 48 - Motor escolhido para o trabalho



O motor escolhido foi o de potência de 3HP, tensão de 220V, frequência de 60Hz e velocidade de rotor de 1725 rpm, Figura 48.

#### 4.1.4. Bus selector

O *bus selector* é a ferramenta que permite retirar as medições do motor. Como pode-se observar da Figura 49, dessa ferramenta se obtém o torque elétrico gerado, a corrente que chega ao estator, a velocidade em rad/s e ainda as voltagens no estator e rotor.

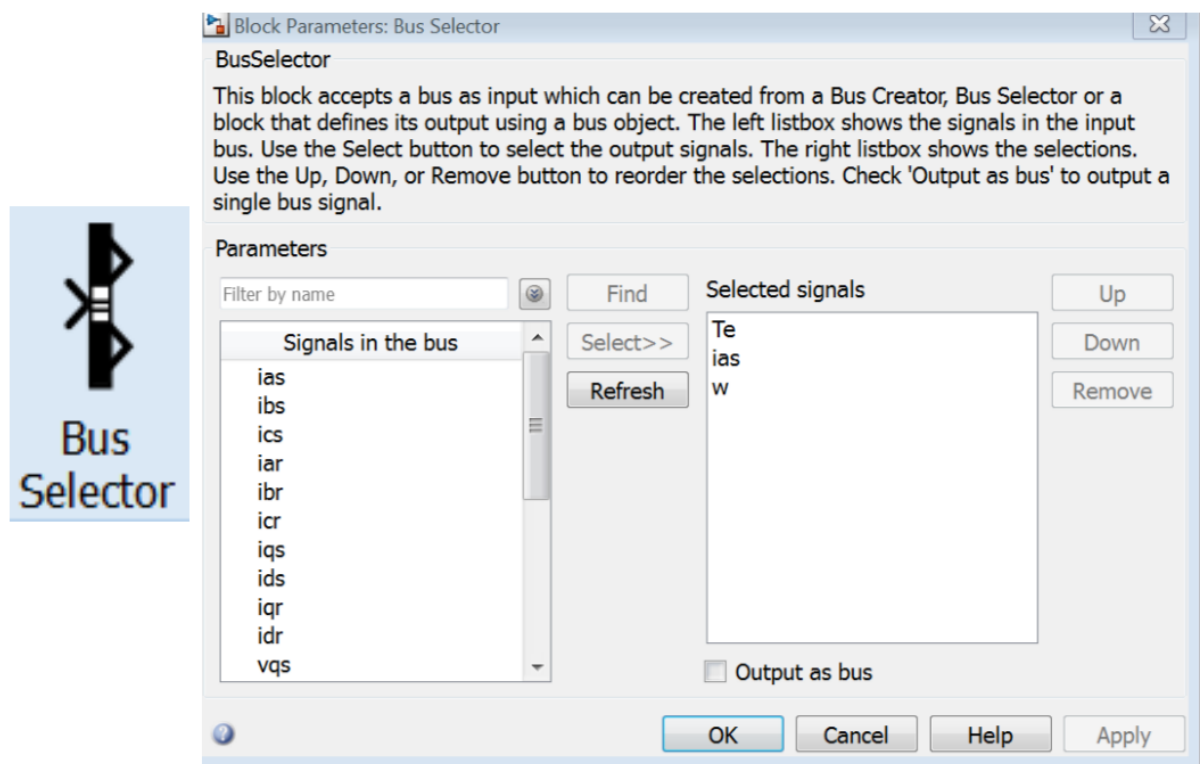


Figura 49 - Bus selector

Essas informações podem ser plotadas no plotador de gráficos *Scope*., Figura 56.

#### 4.1.5. Gain

O ganho será o transformador de velocidade, que vai efetuar a mudança de rad/s para rpm de acordo com a fórmula expressa na Figura 50.

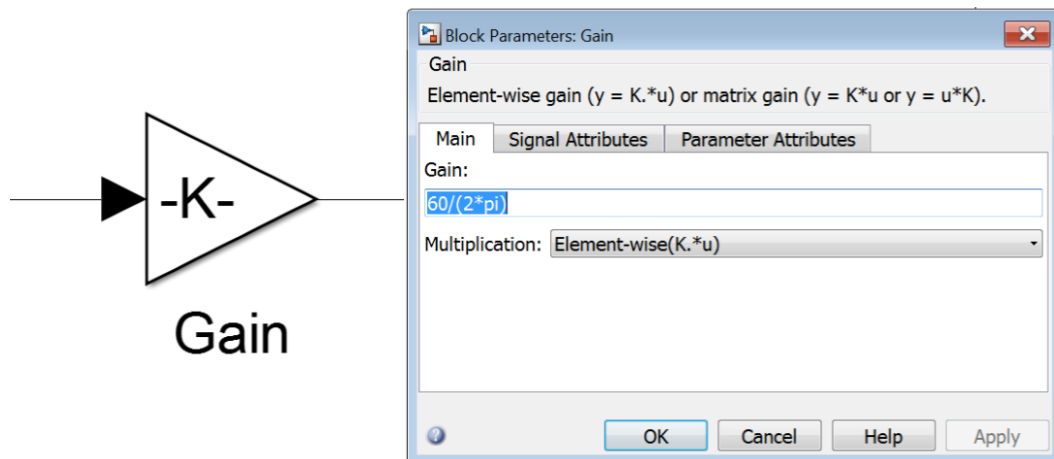
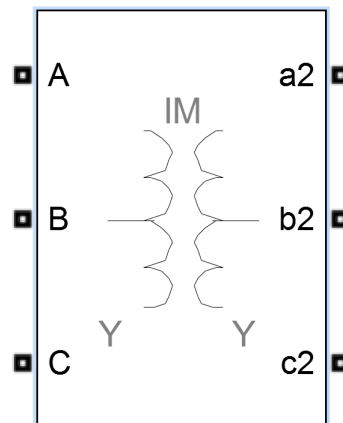


Figura 50 – Ganho

#### 4.1.6. Autotransformador

O Autotransformador é montado a partir do transformador da Figura 51. Deve-se utilizar este transformador pois ele possui a opção, nas suas configurações, de selecionar a função na qual ele será um autotransformador. Ele será utilizado na chave compensadora. Demais explicações estão no capítulo da partida mencionada.



Three-Phase Transformer  
Inductance Matrix Type  
(Two Windings)<sup>1</sup>

Figura 51 - Autotransformador

#### 4.1.7. Contator

O contator é modelado através do disjuntor trifásico representado na Figura 52. Dependendo da utilização ele pode estar aberto ou fechado. No caso do trabalho ele estará fechado, mas depois irá abrir por um comando externo a ele, mas automático. Neste caso é necessário que nas suas configurações esteja selecionada a opção de troca de posição por comando externo. Quando selecionada essa opção,

aparecerá no bloco do contator a entrada de comando externo, onde entrará o sinal que ordenará a comutação. O sinal será feito pelo construtor de sinais.

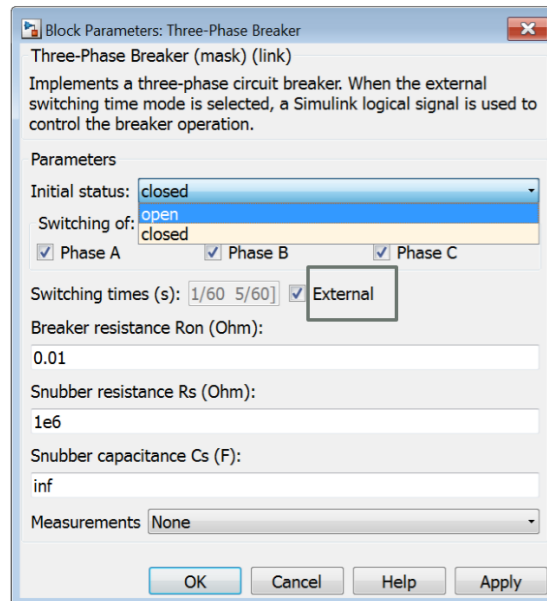
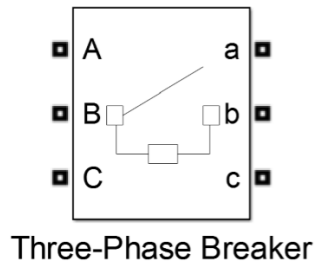


Figura 52 - Contator trifásico

#### 4.1.8. Construtor de sinais

O construtor de sinais é formado pelo bloco *Signal Builder*, Figura 53, onde se gera os comandos de comutação dos contadores. No caso do trabalho, todos os sinais são da forma degrau. É nele que é selecionado o instante da comutação, momento no qual o sinal vai pra zero ou um, dependendo da aplicação. No bloco é possível criar mais de um sinal, Figura 54, e nos tipos de partida haverá tempos diferentes de comutação.

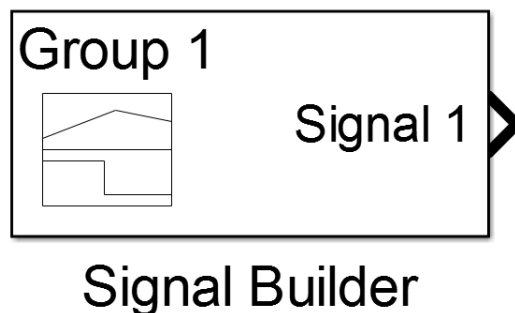


Figura 53 - Construtor de sinais

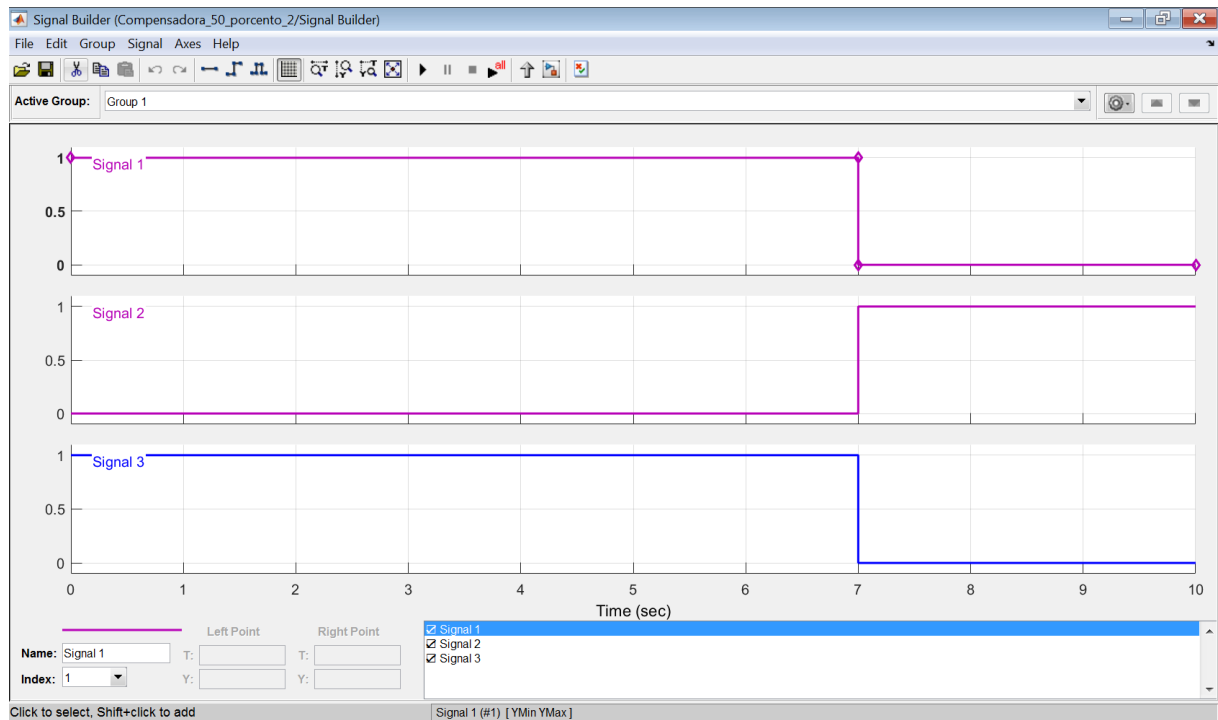


Figura 54 - Configuração do construtor de sinais

#### 4.1.9. Powergui

O *Powergui*, Figura 55, é o bloco de presença obrigatória nos modelos. Este bloco é responsável pela escolha do método de resolução do circuito. Ele é necessário para simular qualquer modelo *Simulink* que contenha blocos de Tecnologia Especializada *Simscape™ Power Systems™*. Ele armazena o circuito *Simulink* equivalente que representa as equações espaço-estado do modelo [23].

Nas simulações foram utilizados o modo contínuo como método de resolução, com a opção de utilização de dispositivos de comutação ideal. Para a chave compensadora essa seleção dos dispositivos foi desfeita.

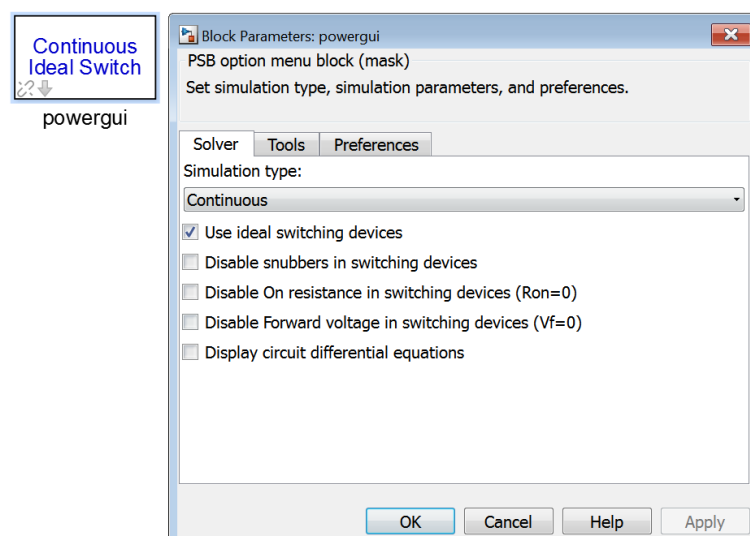


Figura 55 - Bloco powergui

#### 4.1.10. Scope

O *Scope*, Figura 56, é o elemento que fará a plotagem do que foi medido. Ele possui várias possibilidades de modelagem, entre elas plotar mais de um sinal.

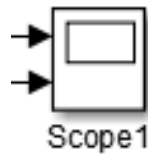


Figura 56 - Plotador de dados

#### 4.1.11. Constant

O *Constant*, Figura 57, é o elemento que fará a simulação do valor da carga a ser partida. Ela deve ser ligada com a entrada  $T_m$  do motor, Figura 48.



Figura 57 - Bloco constante

#### 4.1.12. RMS

O bloco *rms*, Figura 58, é o que vai transformar o valor de entrada para o valor *rms*.

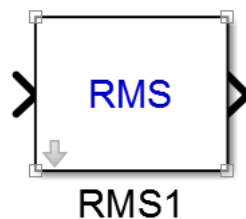
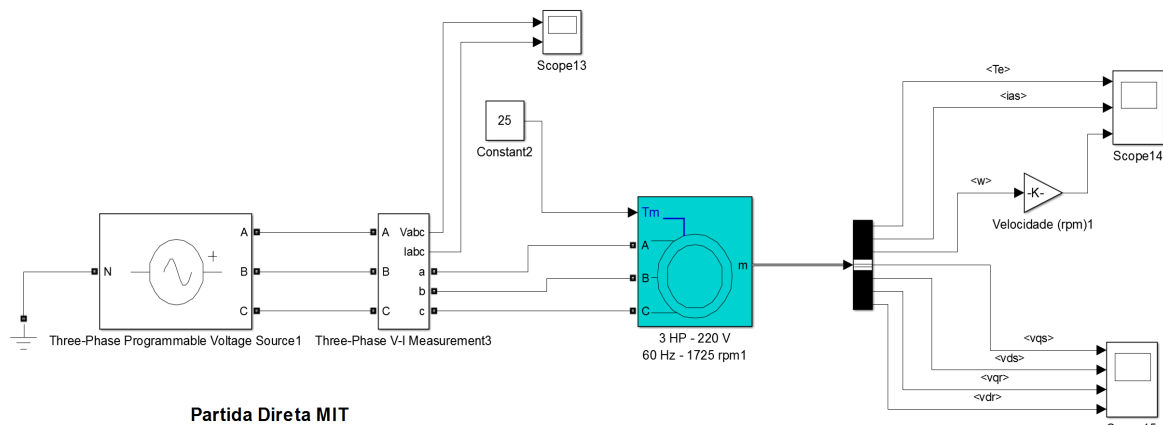


Figura 58 - Bloco *rms*

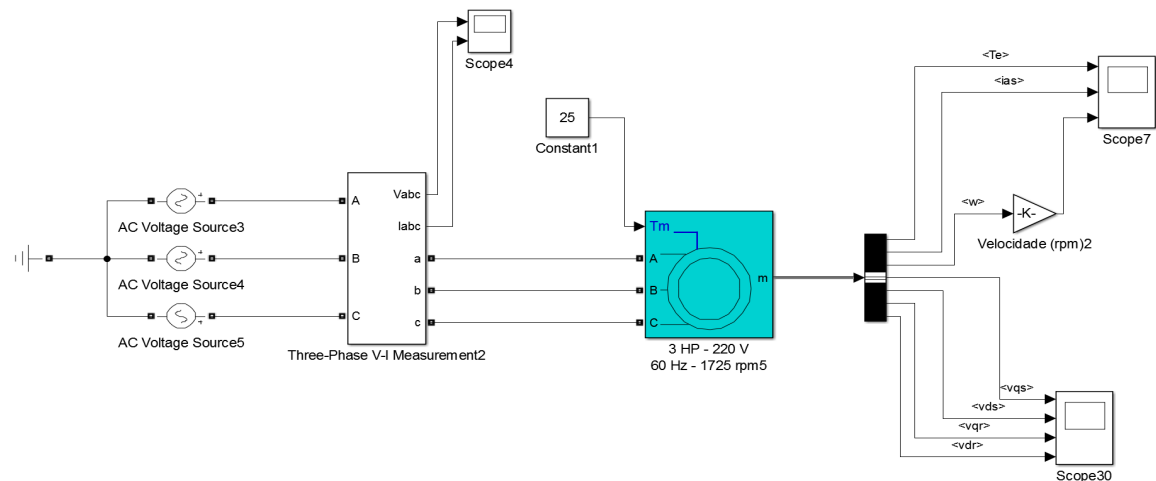
### 4.2. PARTIDA DIRETA

#### 4.2.1. Modelagem

A partida direta é o método cujo o motor é ligado diretamente na rede. Ela consiste na fonte, no multímetro da fonte, do motor, da carga, o bus selector e o ganho. As possibilidades de modelagem do método de partida estão representadas nas Figura 59 e Figura 60. Elas apenas se diferenciam pela fonte utilizada. A fonte trifásica programável foi escolhida para realizar as modelagens dos métodos de partida.



**Figura 59 - Partida Direta Fonte Programável**

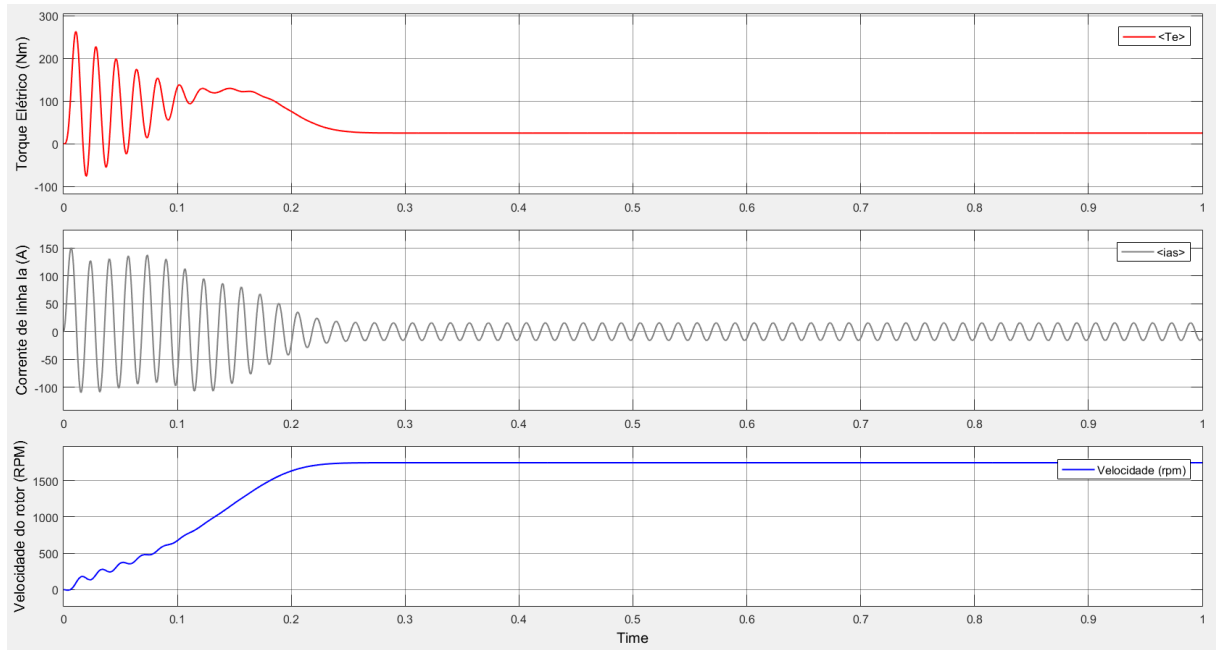


**Figura 60 - Partida Direta Fonte em Estrela**

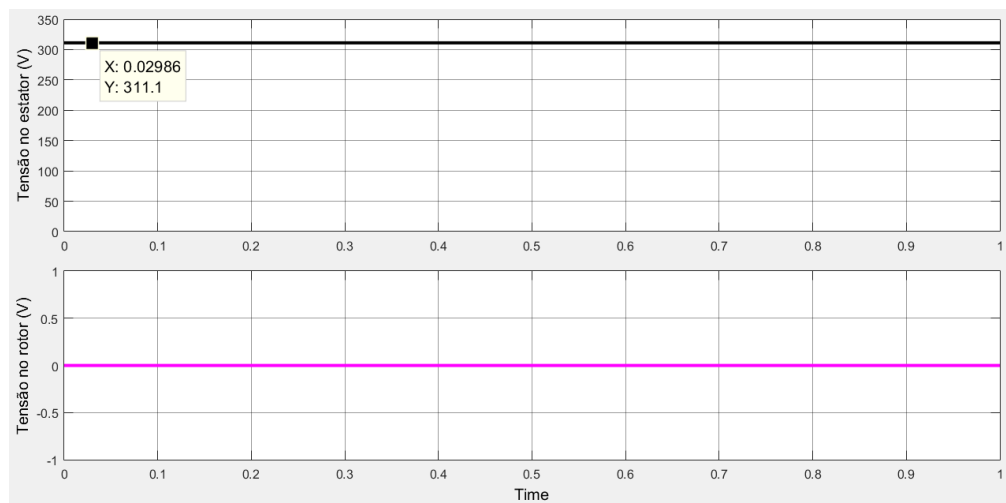
A tensão foi ajustada com o valor de  $220\sqrt{3}$ , tensão fornecida como tensão de linha para o motor ligado na configuração estrela.

#### 4.2.2. Resultados

Assim que se efetua a partida, o torque elétrico sobe para o seu valor máximo de 262 Nm, conforme com a Figura 61 e depois ela estabiliza em 25 Nm, valor este da carga, que foi simulada pela constante no valor de 25. A corrente de partida possui valor de pico de 150A, e, após regime permanente, fica no valor de 15,7A. A velocidade do rotor atinge sua velocidade nominal de 1725 rpm em apenas 0,3s.



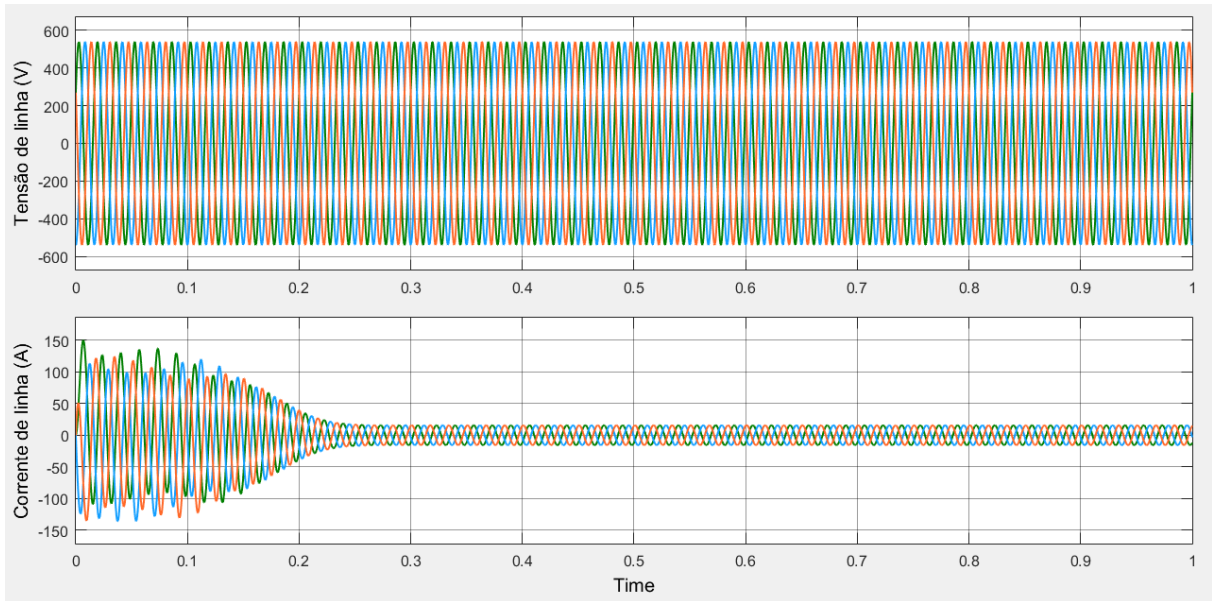
**Figura 61 - Torque, Corrente e Velocidade do rotor para partida direta**



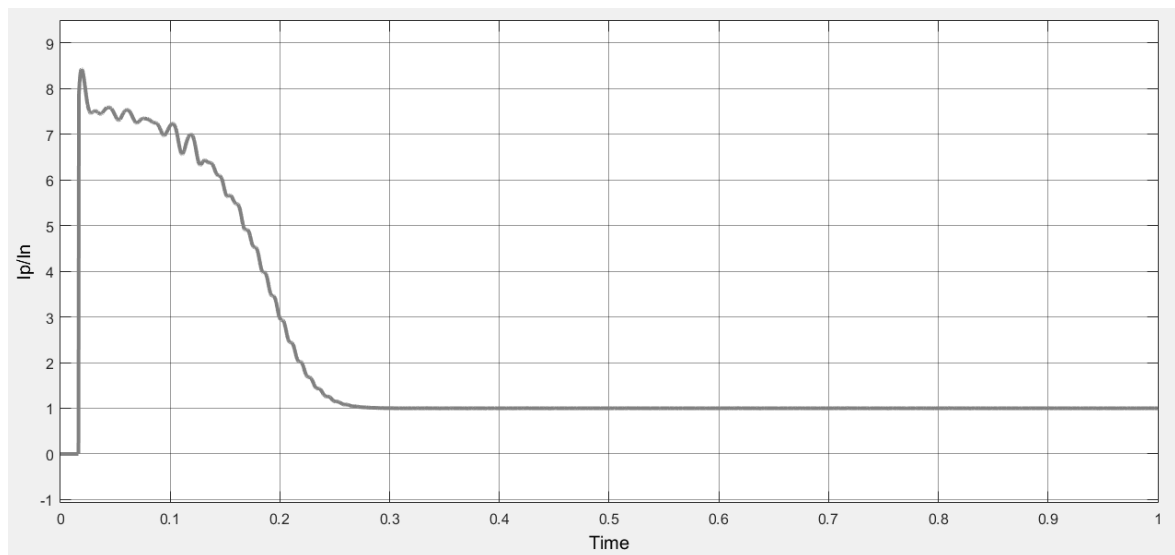
**Figura 62 - Tensão de fase no estator e rotor na partida direta**

Da Figura 62, tem-se a tensão interna do motor. A tensão representada no estator é a de fase, cujo valor rms é 220V, enquanto a de pico é 311V, exatamente como pode-se observar na figura. No rotor não há tensão pois o rotor não tem seus terminais acessíveis, já que eles estão ligados a um ponto comum em cada lado dos enrolamentos, característica do motor gaiola de esquilo.

Da Figura 63 comprova-se que a tensão de linha que sai da fonte é de 538,88V, equivalente a uma tensão rms de 381V. A corrente fornecida pela fonte é a mesma que é consumida pelo motor, já que ele é ligado em estrela.



**Figura 63 - Medições na fonte trifásica**



**Figura 64 - Relação  $I_p/I_n$  na partida direta**

Na Figura 64 pode ser visto que a corrente de partida é 8,42 vezes a nominal, comprovando-se o que é determinado pela teoria. Passado o período de partida, a corrente assume seu valor nominal, fazendo a relação  $I_p/I_n$  ter valor igual a um. O valor nominal da corrente em *rms* é de 11,75A, logo a de partida é de 98,94A.

### 4.3. PARTIDA ESTRELA-TRIÂNGULO

A modelagem da partida estrela-triângulo encontra a dificuldade explicitada anteriormente. Na máquina assíncrona, os enrolamentos do estator e do rotor estão conectados em um ponto neutro interno, como pode ser observado em destaque na



Figura 65. Logo, não é possível desfazer essa conexão para realizar a ligação do estator em triângulo. Desse modo essa modelagem é impossibilitada pois o *Matlab* não disponibiliza um motor com 6 *bornes* (terminais acessíveis) ou mais para a simulação.

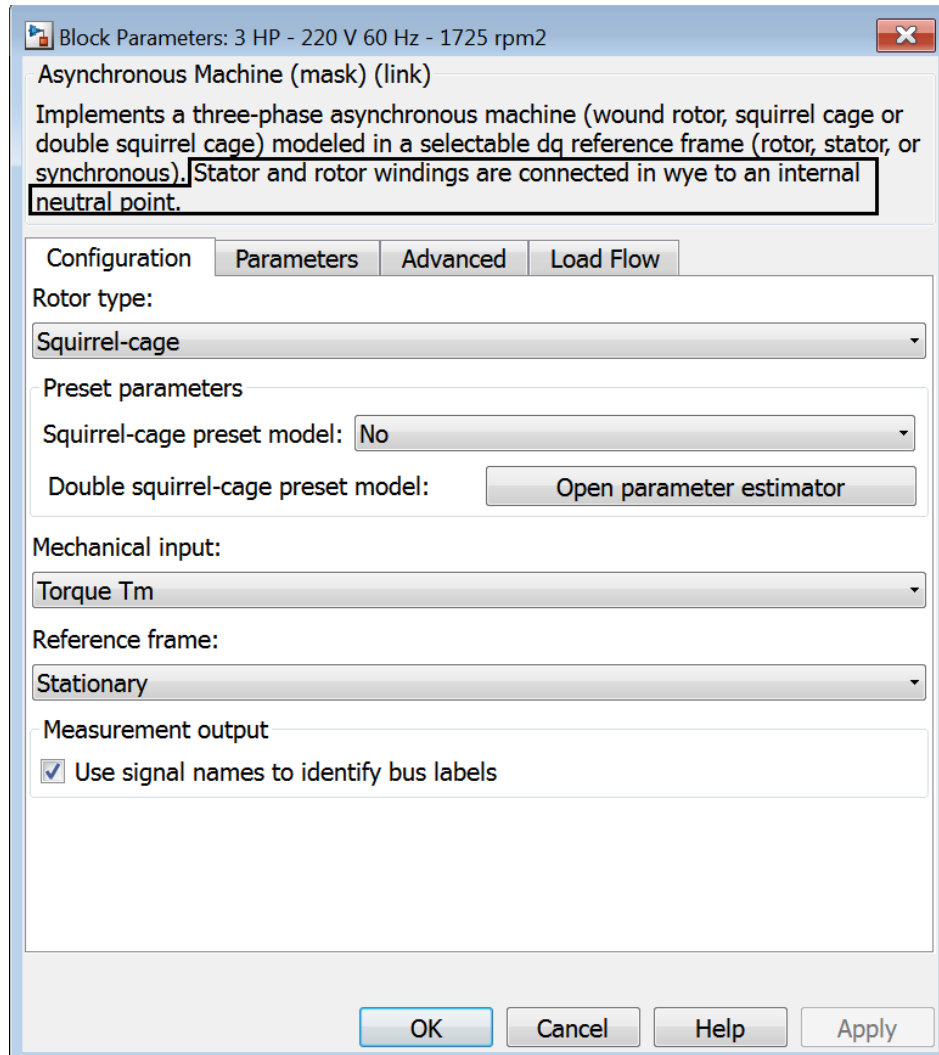
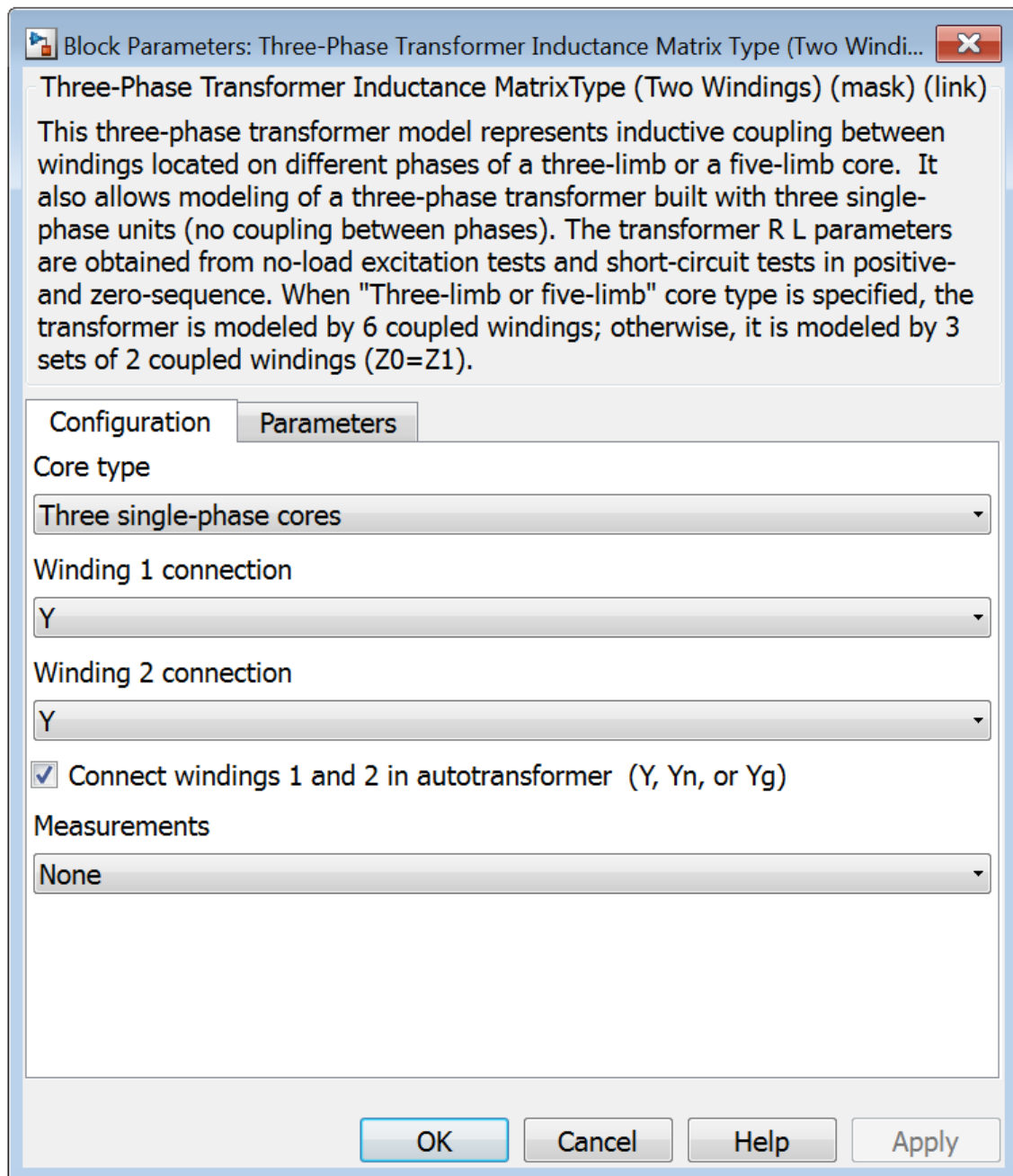


Figura 65 - Ligação interna do motor em estrela

## 4.4. PARTIDA COMPENSADORA

### 4.4.1. Modelagem

A modelagem da chave compensadora é composta a partir do modelo de partida direta. Adiciona-se a ele os contadores, o seu controlador e o transformador, pois o *Simulink* não possui um bloco denominado autotransformador. Então para realizar a simulação, utiliza-se um transformador para realizar a variação da tensão de acordo com o TAP escolhido.



**Figura 66 - Configurações do autotransformador**

O transformador escolhido foi o trifásico de dois enrolamentos. Dentro dele, há a opção de ligá-lo como um autotransformador. Deve-se então selecionar a opção autotransformador e colocá-lo na configuração estrela-estrela, conforme a Figura 66. Sua potência é de 100KVA. As demais características estão contempladas na Figura 67. O circuito montado está na Figura 68.

**Block Parameters: Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windi...**

Three-Phase Transformer Inductance MatrixType (Two Windings) (mask) (link)

This three-phase transformer model represents inductive coupling between windings located on different phases of a three-limb or a five-limb core. It also allows modeling of a three-phase transformer built with three single-phase units (no coupling between phases). The transformer R L parameters are obtained from no-load excitation tests and short-circuit tests in positive- and zero-sequence. When "Three-limb or five-limb" core type is specified, the transformer is modeled by 6 coupled windings; otherwise, it is modeled by 3 sets of 2 coupled windings ( $Z_0=Z_1$ ).

**Configuration** **Parameters**

Nominal power and frequency [Pnom(VA), Fnom(Hz)]

[100e3, 60]

Nominal line-line voltages [V1, V2] (Vrms)

[220\*sqrt(3), 176\*sqrt(3)]

Winding resistances [R1, R2] (pu)

[0.01, 0.01]

Positive-sequence no-load excitation current (% of Inom)

2

Positive-sequence no-load losses (W)

1000

Positive-sequence short-circuit reactance XHL (pu)

0.06

OK Cancel Help Apply

Figura 67 - Parâmetros do autotransformador

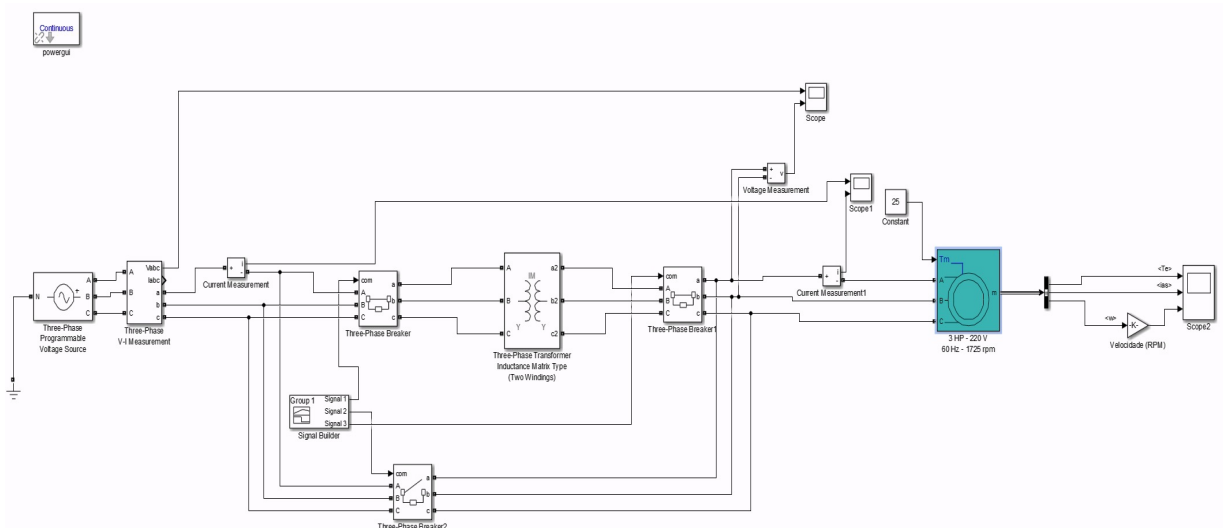


Figura 68 - Circuito da partida compensadora

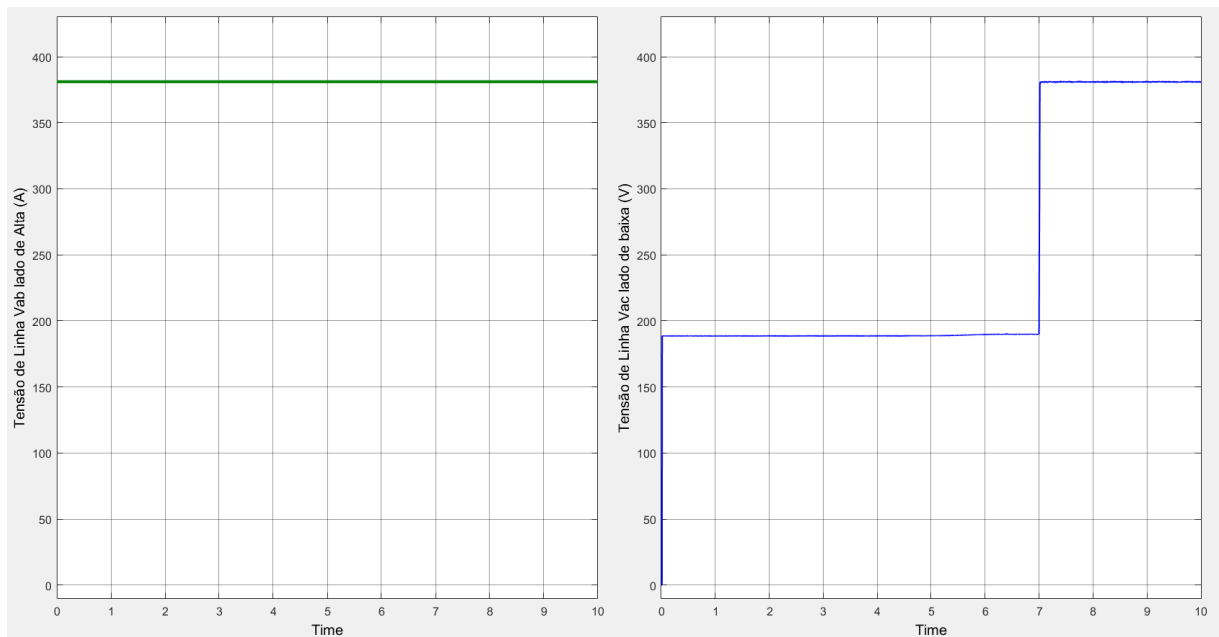
O valor na fonte de tensão trifásica deve ser de  $220\sqrt{3}$ . A relação de transformação vai seguir de acordo com o TAP escolhido, como explicitado na Tabela 3. Os três TAPs foram simulados.

**Tabela 3 - Valores das relações de TAP do autotransformador**

TAP de transformação ( $\beta$ )	$\beta^2$	Tensão no secundário do transformador		
		Valor nominal	Valor rms	Valor de pico
0,5	0,25	$110\sqrt{3}\text{V}$	190,5V	270V
0,65	0,4225	$143\sqrt{3}\text{V}$	247,68V	350V
0,8	0,65	$176\sqrt{3}\text{V}$	304,84V	431V
1	1	$220\sqrt{3}\text{V}$	381V	538V

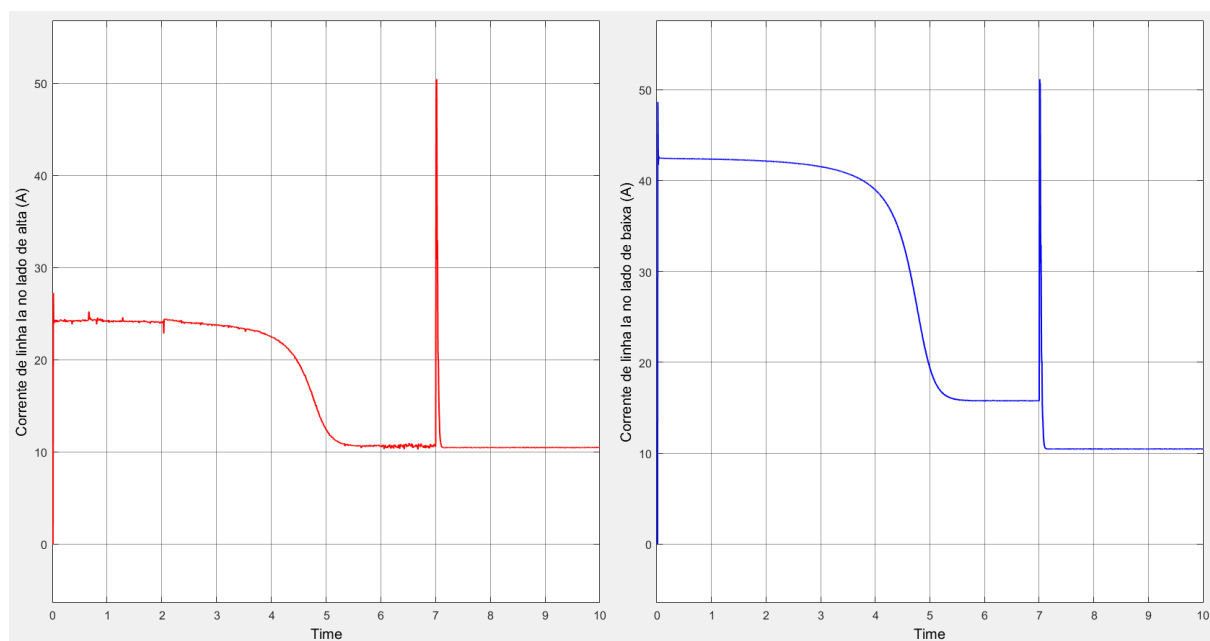
#### 4.4.2. Resultados

O TAP de 50% abaixa o nível de tensão para um patamar no qual o motor não consegue partir a carga. Então para essa simulação a carga foi reduzida para 22 Nm, que é a carga máxima que esse nível de tensão consegue partir na simulação.



**Figura 69 - Tensões de linha relativas aos terminais do autotransformador para o TAP 50%**

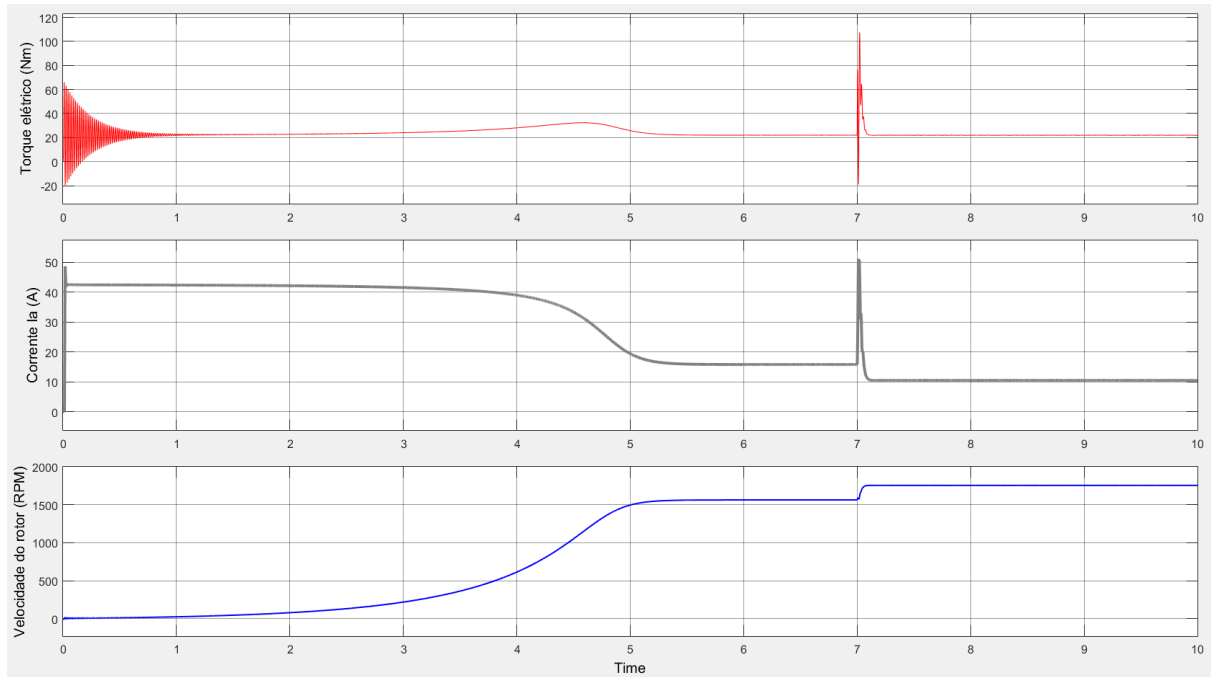
Na Figura 69, tem-se a representação da tensão de linha saindo da fonte, que é a mesma do lado de alta do autotransformador, e a do lado de baixa do autotransformador, que é a tensão que chega ao motor. Como pode se observar, a tensão da linha saída da fonte é de aproximadamente 381V, pois é o valor *rms* da voltagem de  $220\sqrt{3}$ . A tensão do motor na partida, em *rms*, é de aproximadamente 190,5V, confirmando com o valor previsto na Tabela 3. Passado o tempo de comutação, o motor passa a receber a tensão nominal, e passa a funcionar em regime permanente.



**Figura 70 - Correntes no lado de alta e baixa do circuito para o TAP 50%**

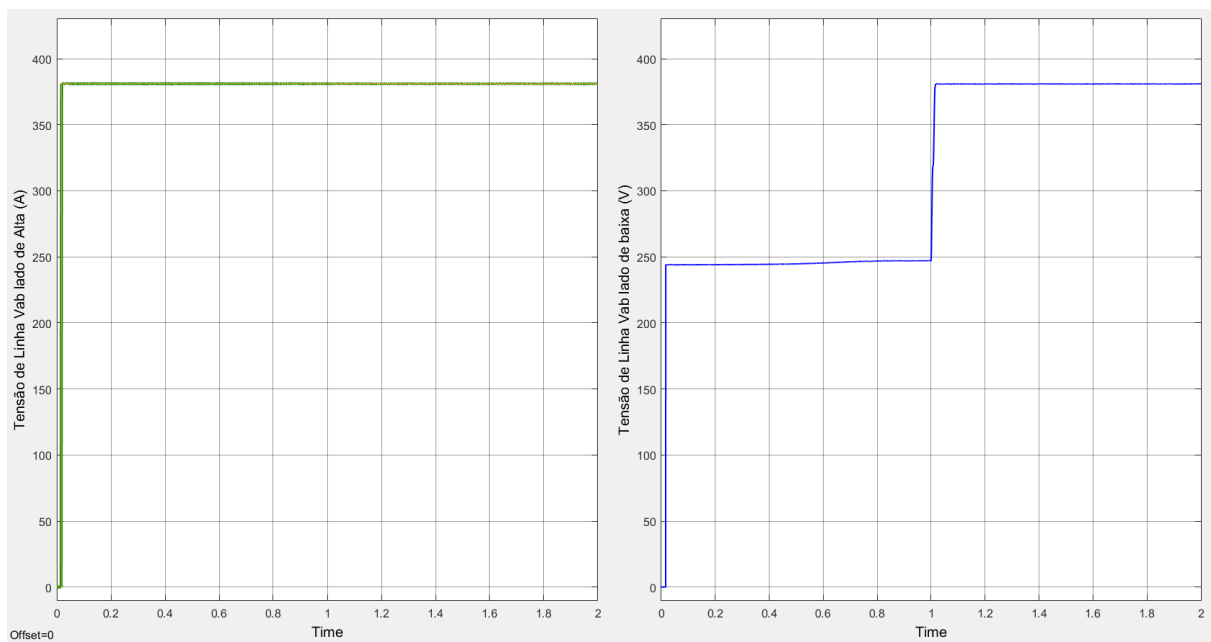
A corrente de partida na fonte trifásica é diminuída por causa do autotransformador. Ela deveria ser a metade da observada no motor. Como pode ser visto na Figura 70, a corrente não chegou a este valor, mas próximo. A corrente no motor foi de aproximadamente 48,75A, enquanto que na fonte foi de 27,5A.

De acordo com o observado na Tabela 3, o conjugado para o TAP de 50 deveria ser diminuído a 25%. Como pode ser observado na Figura 71, o valor do torque foi de aproximadamente 66Nm, o que corresponde a 25,2% do de partida direta que é 262Nm.

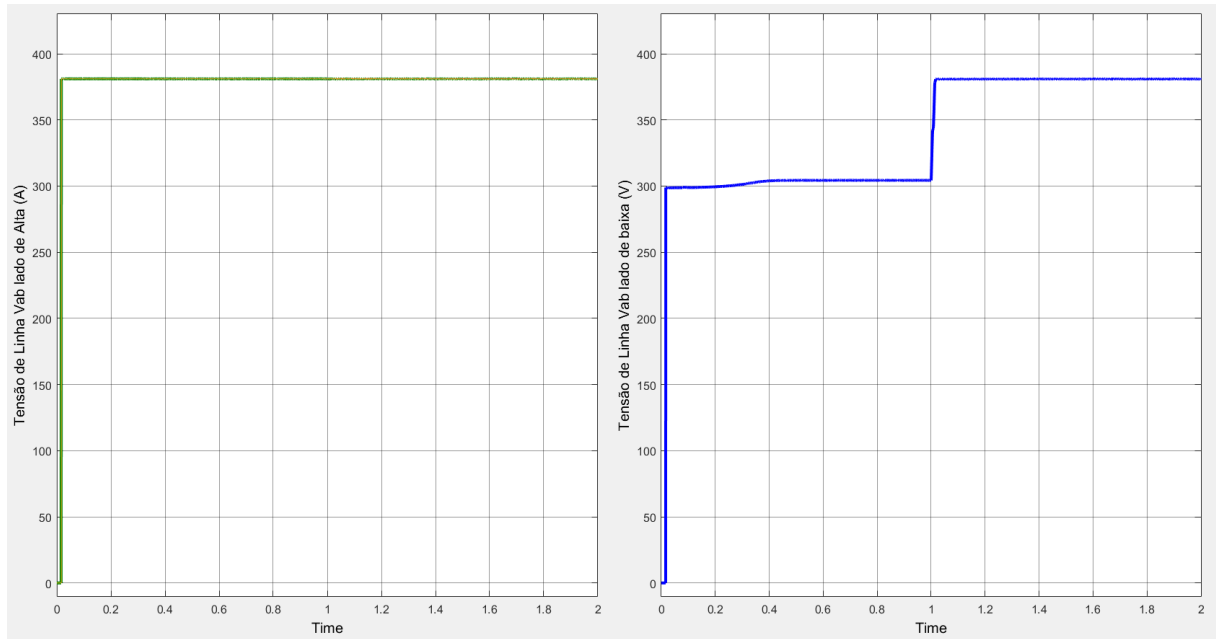


**Figura 71 - Torque, corrente e velocidade do rotor para o TAP 50%**

Para o TAP de 65% e 80%, as tensões conseguem dar a partida com a carga de 25Nm. Nas Figura 72 e na Figura 73, estão representadas as tensões observadas nas simulações de TAP a 65% e 80%, respectivamente. Seus valores de tensão de pico, foram, respectivamente, 246,78V e 304,05V, praticamente iguais aos valores da Tabela 3.

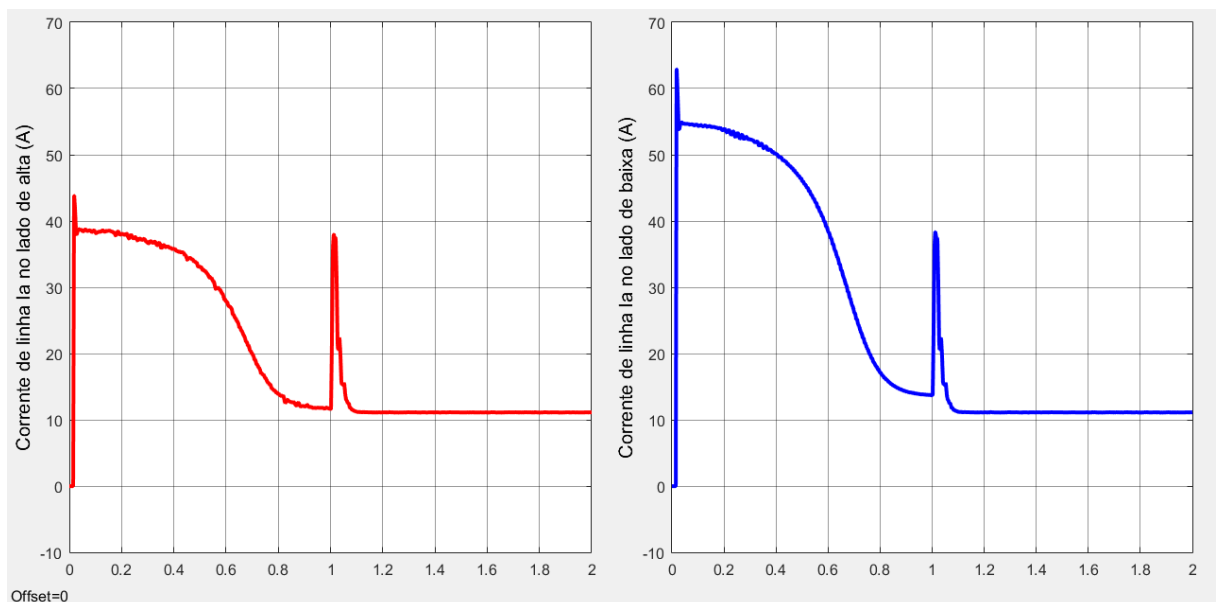


**Figura 72 - Tensões de linha relativas aos terminais do autotransformador para o TAP 65%**



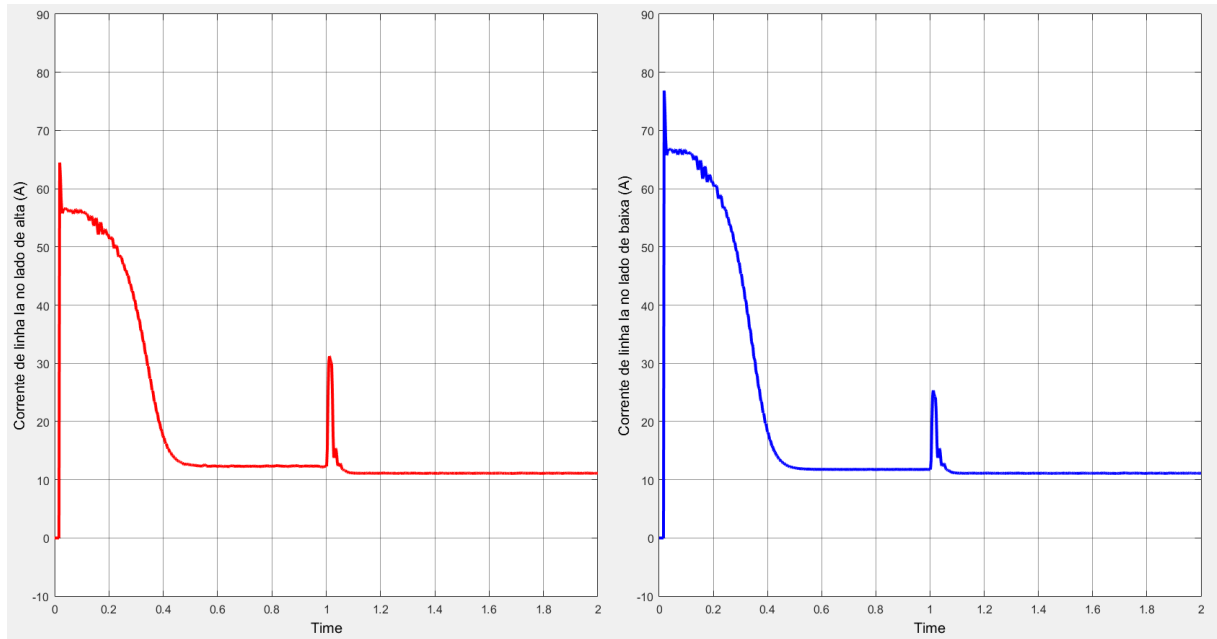
**Figura 73 - Tensões de linha relativas aos terminais do autotransformador para o TAP 80%**

As correntes de partida estão representadas na Figura 74 e na Figura 75. Para o TAP de 65%, a corrente do motor teve seu valor máximo de 62,9A, enquanto que no lado primário a corrente observada foi de 43,66A. A corrente foi reduzida em 30,58%.



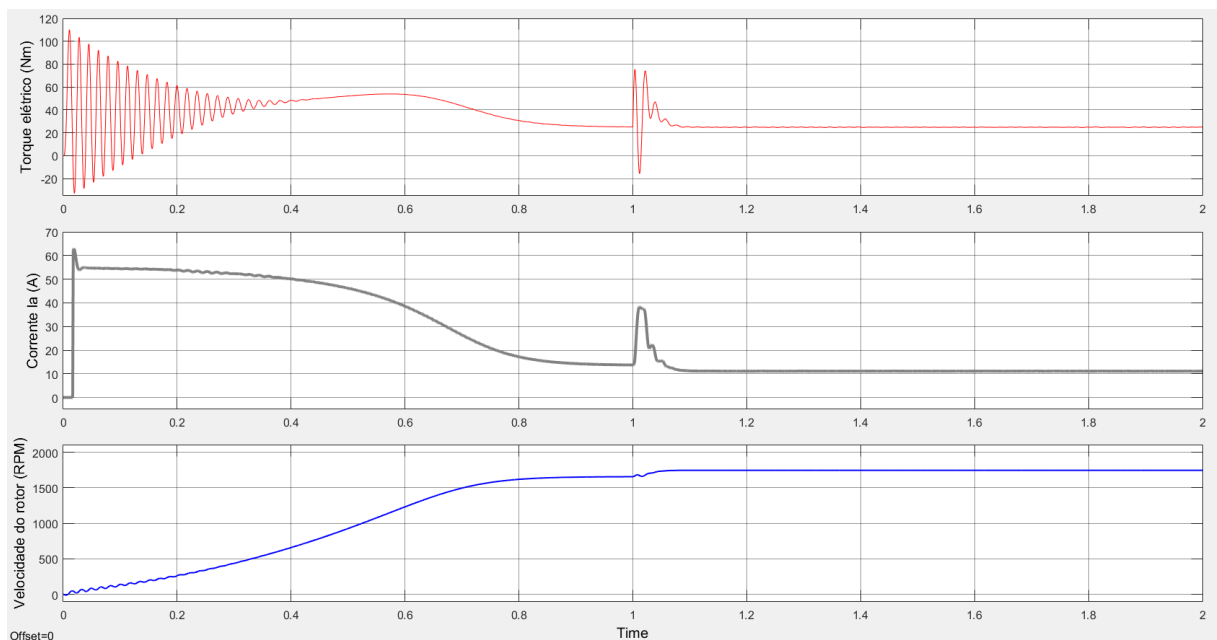
**Figura 74 - Correntes no lado de alta e baixa do circuito para o TAP 65%**

Para o TAP de 80% a corrente de pico do motor é próxima a 76,86A, enquanto que, no lado de alta, a corrente ficou próxima a 64,48A. Uma redução de aproximadamente 16,10%.



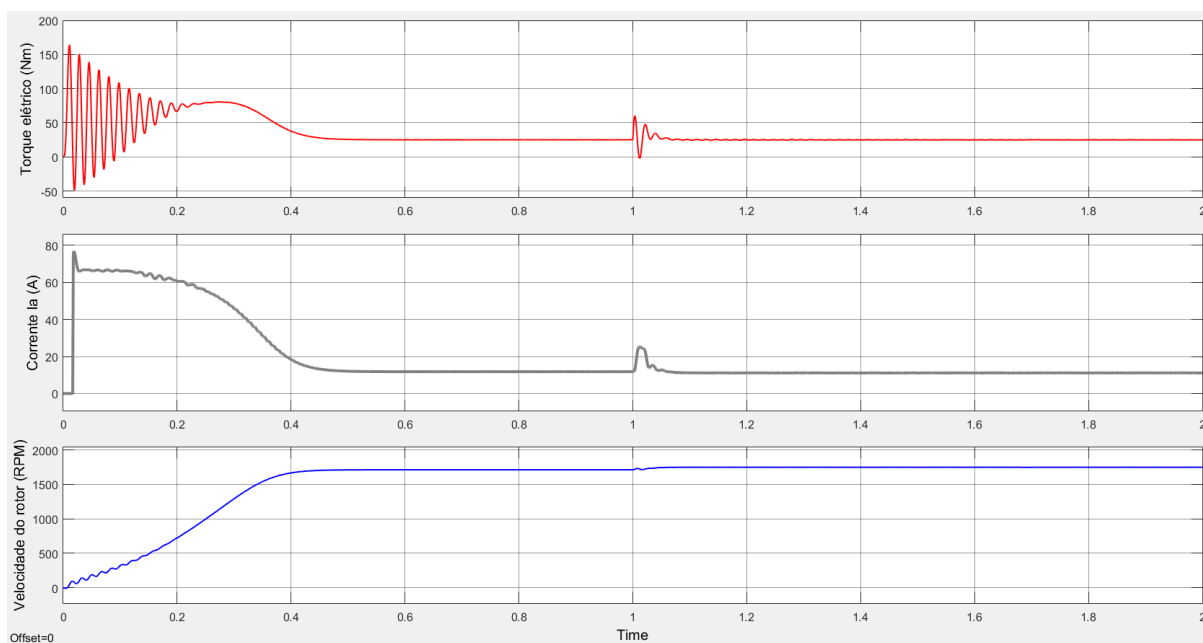
**Figura 75 - Correntes no lado de alta e baixa do circuito para o TAP 80%**

O valor do conjugado na partida direta foi de 262Nm. Com o TAP de 65%, o valor máximo de conjugado foi de 110Nm, o que equivale aproximadamente a 42% em relação ao conjugado do de partida direta. Com o TAP de 80%, o valor máximo do conjugado foi de 164Nm, o que resultou num percentual de 62,60% em relação ao de partida direta.



**Figura 76 - Torque, corrente e velocidade do rotor para o TAP 65%**





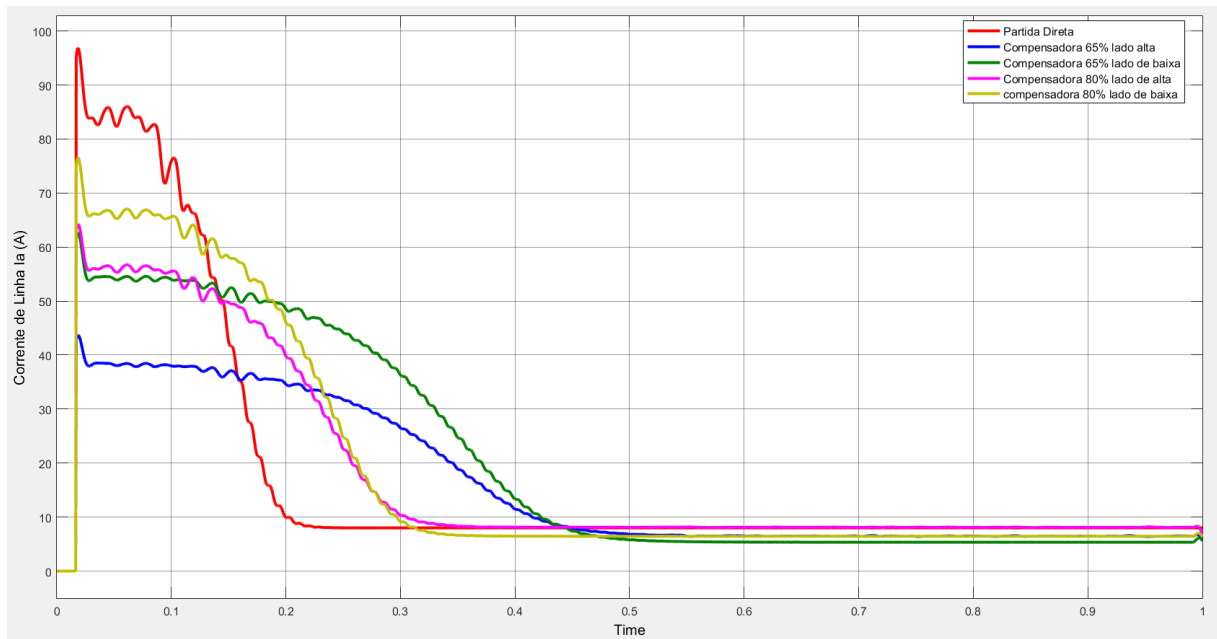
**Figura 77 - Torque, corrente e velocidade do rotor para o TAP 80%**

Na Figura 70, Figura 74 e Figura 75, as correntes efetuam um aumento de amplitude devido à comutação para a tensão nominal. Esta ocorrência é devido ao ajuste de corrente do motor para os novos parâmetros de funcionamento, e pode se comparar a uma pequena partida direta. Há um pico de corrente que rapidamente se extingue e iguala a corrente nominal. Mas o valor do pico é menor que da corrente de partida. Isso ocorre devido ao motor estar funcionando e o rotor girando na hora da troca. Logo a inércia já é menor que quando o motor está parado, o que demanda menos corrente para realizar a movimentação do rotor. Além disso, o autotransformador, que é por natureza um indutor, ele resiste à passagem da corrente e irá contribuir para a diminuição da magnitude da corrente na hora da transição.

#### 4.5. COMPARATIVO PARTIDAS

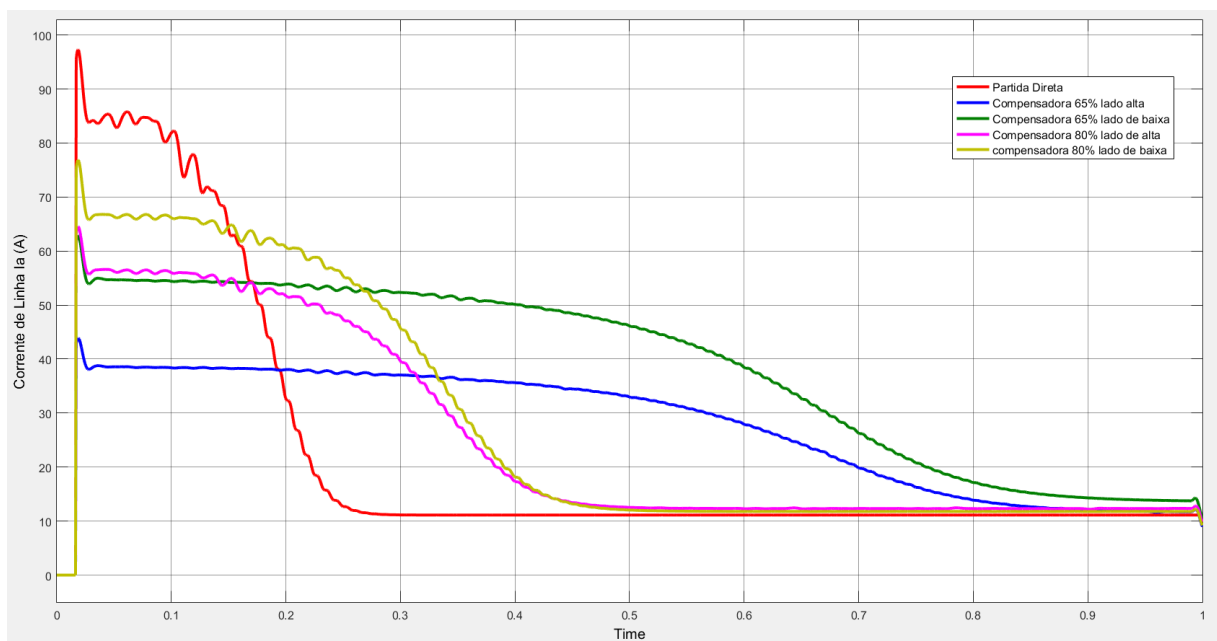
Plotando todas as correntes juntas, fica bastante claro como cada partida se comporta. Na Figura 78 simula-se um torque de 3Nm enquanto que na Figura 79 é simulado um torque mecânico de 25Nm. Observa-se que a corrente da partida direta possui o pico mais alto, mas é a que atinge mais rapidamente a corrente nominal. As correntes da partida compensadora a 80% são maiores que as de 60%, inclusive sendo a do lado de baixa a 80% maior que a de alta a 60%. As correntes da chave compensadora a 60% por serem mais baixas levam mais tempo para atingir a corrente nominal. Ambos compensadores são comutados ao mesmo tempo

no instante de um segundo. Como o enfoque são as partidas, a representação da comutação foi ocultada.



**Figura 78 - Comparativo das linhas para carga de 3Nm**

Comparando a Figura 78 e Figura 79, percebe-se que os valores dos picos não mudaram mesmo com a mudança do torque, pois ele está relacionado às características do motor e não à carga. Ela vai se relacionar com o conjugado de resistência do motor. Observa-se isso porque as correntes levam mais tempo para atingir o valor nominal.



**Figura 79 - Comparativo das linhas para carga de 25 Nm**

## 5. CONCLUSÕES

A partida direta é a melhor quando exige alto torque. Ela apresentou um torque de 262Nm, o maior torque gerado pelo motor entre as partidas. A corrente dela também foi a maior entre as correntes dos outros métodos. A partida direta deve ser utilizada para casos de torque alto, mas com sistema elétrico preparado para altas correntes.

Na partida estrela-triângulo, a necessidade de que o motor possua 6 *bornes* ou mais acessíveis restringe o método. Essa restrição atingiu a simulação, na qual a ferramenta não disponibiliza um motor com essas características, pois o motor é internamente ligado em estrela, impossibilitando a simulação da partida.

**Tabela 4 - Resumo dos resultados**

	Direta	Compensadora		
		50%	65%	80%
<b>Te</b>	262 Nm	66 Nm	110 Nm	164 Nm
<b>Ia</b>	98,94A	-	-	-
<b>Ia lado de alta</b>	-	27,5A	43,66A	64,48A
<b>Ia lado de baixa</b>	-	48,75A	62,9A	76,86A
<b>V<sub>linha</sub> motor</b>	381V	190,5V	246,78V	304,05V
<b>V<sub>linha</sub> fonte</b>	381V	381V	381V	381V

A partida compensadora com o autotransformador diminui as tensões que chegam aos terminais do motor e por consequência as correntes no motor diminuem em relação à corrente de partida direta. Na Tabela 4 os valores de alta e baixa são referidos aos terminais do autotransformador. O lado de baixa é onde está ligado o motor, enquanto que o de baixa está ligada a fonte. Vale ressaltar que nas simulações para o TAP de 50% foi necessário diminuir o conjugado para que ocorresse a simulação, pois o conjugado de resistência foi mais alto que o de partida.

Para a partida a 50%, houve uma redução de 43,6% no valor da corrente que passa na fonte em relação à observada no motor. Na partida a 65%, uma redução de 30,58%, e na partida a 80%, uma redução de 16,10%.

Comparando a corrente que passa no motor na partida compensadora e a que passa na direta, tem-se que: a compensadora a 50% apresentou uma corrente

50% menor, a compensadora a 65% apresentou uma corrente 36,42% menor e a compensadora a 80% uma a 22,31% menor.

A redução de torque obtida para as partidas compensadoras a 50%, 65% e 80% foram, respectivamente: 25,2%, 42% e 62,60%. Valores bem próximos aos 25%, 42,25% e 65% esperados na teoria. Todos os valores de redução de corrente e conjugado ficaram satisfatórios e próximos aos valores teóricos.

A *soft-starter* não foi simulada mas se pode ver pela teoria que ela possui muitas vantagens, como a rampa de aceleração e a rampa de frenagem, realiza proteção, limita a corrente, se necessário faz uma partida com corrente mais alta (*kick-start*) para conjugados elevados e ainda economiza energia.

Cada tipo de partida tem um suas qualidades e peculiaridades. Deve-se observar os requisitos de carga para escolha da chave de partida, saber que o controle é feito com a variação da tensão e conhecer bem as vantagens e desvantagens de cada método [22]. Mas conhecendo essas características, pode-se fazer uma boa escolha de qual método utilizar para um determinado local, projeto ou atividade. E assim se possa ter um bom custo benefício e um bom retorno. Fazer uma boa escolha de equipamento através das características levantas pela necessidade, ferramentas a disposição e conhecimento técnico. Fazendo-se assim um bom e seguro projeto de instalação.

## 6. TRABALHOS FUTUROS

Como uma ferramenta de grande utilidade, o *Matlab* pode ser utilizado para melhor compreender as diferenças entre os métodos de partida. Didaticamente, ao se plotar o comportamento da corrente, se visualiza melhor o comportamento dela. Em sala de aula, essa visualização ajuda no ensino de máquinas elétricas e suas partidas. Montagem de roteiros experimentais para laboratórios.

Para trabalhos futuros, a modelagem e simulação de outros métodos de partida: *Soft-starter* e inversor de frequência. Desenvolvimento da partida estrela-triângulo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] BARBI, Ivo. Teoria fundamental do motor de indução, Editora da UFSC, Eletrobrás, 1985.
- [2] KRAUSE, Paul. Analysis Of Eletric Machinery, Editora McGraw-Hill, New York, 1986
- [3] VINCET, Del Toro. Fundamentos de Máquinas Elétricas, Editora Prentice-Hall do Brasil LTDA, Rio de Janeiro.
- [4] MAMEDE FILHO, João. Instalações elétricas industriais. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2001.
- [5] FRANCHI, Claiton Moro. Acionamentos elétricos, Editora Érica Ltda, São Paulo, 2008.
- [6] CREDER, Hélio. Instalações elétricas. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995.
- [7] ABNT NBR 5410:2004.
- [8] NETO, João Alves Neto. Comandos Elétricos. Acesso em : [http://www.cefetsp.br/edu/jaan/com\\_ele.html](http://www.cefetsp.br/edu/jaan/com_ele.html). Visualizado: 29/05/2015.
- [9] SIEMENS. Módulo 3 S Coordenação de Partidas de Motores Elétricos.
- [10] MORAES, Everton. Sala da Elétrica, Partida Direta. Acesso em : <http://www.saladaeletrica.com.br/partida-direta-de-motor-trifasico/>. Visualizado em: 29/05/2015.
- [11] <http://evtech.com.br/usuario/Partida%20de%20Motores.pdf>. Visualizado em: 29/05/2015.
- [12] FERNANDES, L. F. J. Escolha do tipo de chave de partida.
- [13] UNICAMP. Tiristores e Retificadores Controlados. Acesso em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/ee833/Modulo2.pdf>. Visualizado: 29/05/2015.
- [14] ROSA, Alex da. Simulação de um Soft-Starter para Acionamento de Motores de Indução, 2003.
- [15] USP. Máquinas Assíncronas Teoria, 2001. Acessado em: [http://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/31672/mod\\_resource/content/1/Teoria.pdf](http://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/31672/mod_resource/content/1/Teoria.pdf). Visualizado em 25/06/2015.

[16] MORAES, Everton. Sala da Elétrica, Partida compensadora. Acesso em : <http://saladaeletrica.blogspot.com.br/2010/03/partida-de-chave-compensadora-ou-por.html>.

Visualizado em: 29/05/2015.

[17] MORAES, Everton. Sala da Elétrica, Partida compensadora. Acesso em : <http://www.saladaeletrica.com.br/partida-estrela-triangulo/>. Visualizado em: 29/05/2015.

[18] GEAQUINO, Helton, Assunção, José. Desenvolvimento de um algoritmo para a simulação do motor trifásico de indução, 2006.

[19] BRITO, Claudio Marzo Cavalcanti de, Modelagem computacional de métodos de partida de um motor de indução trifásico no SIMULINK/MATLAB, João Pessoa, 2007.

[20] RÊGO Segundo, Alan Kardek. Eletrônica de potência e acionamentos elétricos. Alan Kardek Rêgo Segundo; Cristiano Lúcio Cardoso Rodrigues. Ouro Preto: Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Ouro Preto, 2015.

[21] ABBAY, M. Halmare, ASHISH Karnase, SWAPNIL Kourati. Comparative Study of Induction Motor Starters using MATLAB Simulink, 2016.

[22] CASTRO, A. C. Partida de Motor de Indução Trifásico. Acesso em : <http://alexandrecezar.vl1.net2.com.br/partidamit.pdf>. Visualizado em: 01/07/2017.

[23] MATLAB, suporte.